

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže



**Nepřímý způsob on-line měření kvality povrchu pomocí  
akustické emise**

**Indirect Way of On-line Measurement of Surface Quality  
using by Acoustic Emission**

**Student:**

Bc. Jakub Slunečka

**Vedoucí diplomové práce:**

doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.

**Ostrava 2013**

## Zadání diplomové práce

Student:

**Bc. Jakub Slunečka**

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

2303T002 Strojírenská technologie

Téma:

**Nepřímý způsob on-line měření kvality povrchu pomocí akustické emise**  
**Indirect Way of On-line Measurement of Surface Quality using by**  
**Acoustic Emission**

Zásady pro vypracování:

1. Analýza současného stavu řešené problematiky.
2. Definování nedostatků a návrh řešení problému.
3. Experimentální metodika a experimentální ověření.
4. Výsledky a diskuze.
5. Nový přístup k řešeným problémům.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] HLOCH, Sergej; VALÍČEK, Jan. *Vplyv faktorov na topografiu povrchov vytvorených hydroabrazívnym delením*, 1. vyd, Prešov : FVT TUKE, 2008, 125 s. ISBN 978-80-553-0091-7.
- [2] HLOCH, Sergej; VALÍČEK, Jan. *Teoetické spracovanie a základný projekt prevádzkovej aplikácie automatizovaného riadenia technológie hydroabrazívneho delenia technických materiálov*, 1. vyd., Prešov : FVT TUKE, 2008, 77 s. ISBN 978-80-553-0133-4.
- [3] HLOCH, Sergej; VALÍČEK, Jan. *Riadenie kvality povrchov vytvorených hydroabrazívnym delením pomocou vibrácií a hluku*, 1. vyd., Prešov : FVT TUKE, 2009, 99 s. ISBN 978-80-553-0316-1.
- [4] HLOCH, Sergej et al. *On-line identifikácia hydroabrazívneho delenia pomocou akustickej emisie a vibrácií*, 1. vyd., Prešov : FVT TUKE, 2011, 124 s. ISBN 978-80-553-0698-8.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.**


Konzultant diplomové práce: doc. Ing. Sergej Hloch, PhD.

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013

  
Ing. et Ing. Mgr. Jana Petřů, Ph.D.  
vedoucí katedry

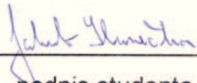


  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

#### **Místopřísežné prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomovou práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

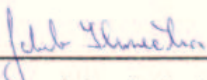
V Ostravě 10.5.2013

  
\_\_\_\_\_  
podpis studenta

### Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská –Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová (bakalářská) práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 10.5.2013

  
\_\_\_\_\_  
podpis studenta

Jakub Slunečka

Veletiny 216

687 33



## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

SLUNEČKA, J. *Nepřímý způsob on-line měření kvality povrchu pomocí akustické emise*  
Ostrava: katedra obrábění a montáže, Fakulta strojní VŠB – Technická univerzita  
Ostrava, 2013, 148 s. Diplomová práce, vedoucí: doc. Ing. Robert ČEP, Ph.D.

Tato diplomová práce se zabývá nepřímým způsobem on-line měřením kvality povrchu pomocí akustické emise. V úvodní části práce je popsán vývoj a teoretické poznatky o technologii hydroabrazivního obrábění. Následující kapitola je věnována vlastnímu experimentu. Na začátku výzkumné práce je seznámení s technologickými parametry experimentu, softwarovým vybavením a samotným členěním vzorků. Začátek výzkumné práce se zaměřuje na průběhy signálů akustické emise v jednotlivých úsecích experimentálních vzorků, jejich porovnání a vyhodnocení stability řezného procesu. Další část obsahuje FFT spektrální analýzu, kde vyhledáváme periodické nárůsty či poklesy amplitud. Grafické analýzy v závěru práce jednak zkoumají významnost faktorů ovlivňujících měřenou hodnotu a dále zobrazují a porovnávají hodnoty mediánu a Peak to Peak v jednotlivých úsecích při daných technologických parametrech. Výsledkem je polynomická regrese 4 řádu a následné regulační rovnice, které mohou být aplikovány v procesu on-line řízení.

## **ANNOTATION OF MASTER THESIS**

SLUNEČKA, J. *Indirect Way of On-line Measurement of Surface Quality using by Acoustic Emission* Ostrava: Department of Machining and Assembly, Faculty of Mechanical Engineering VŠB - Technical University of Ostrava, 2013, 148 p. Diploma's Work, tutor: doc. Ing. Rober Čep, Ph.D.

This thesis deals with the indirect method on-line measurement of surface quality using acoustic emission. In the introductory part of the thesis the development and theoretical knowledge of the technology hydroabrasive machining is described. The following chapter is devoted to the experiment. At the beginning of the research is to introduce the technological parameters of the experiment, software programs and the actual breakdown of the samples. Top of research work focuses on acoustic emission waveforms in the other experimental samples to compare and evaluate the stability of the cutting process. Another section contains the FFT spectrum analysis, where they seek periodic increases or decreases in amplitude. Graphical analysis of the present work, first examine the significance of factors affecting the measured value and display and compare the median value and the Peak to Peak in the individual sections for the given process parameters. The result is a polynomial regression Procedure 4 and subsequent control equations, which can be applied in the process of on-line control.

# OBSAH

<b>SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ, SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>4</b>
<b>CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE.....</b>	<b>6</b>
<b>1. VÝVOJ A ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU AWJ A WJM .....</b>	<b>7</b>
1.1 VÝVOJ.....	7
1.2 SOUČASNÝ STAV VÝVOJE AWJ .....	9
<b>2. TECHNOLOGIE AWJ A WJM .....</b>	<b>10</b>
2.1 TECHNOLOGICKÁ SOUSTAVA PRO AWJ A WJM .....	10
2.1.1 Hydraulické čerpadlo .....	10
2.1.2 Akumulátor tlaku .....	11
2.1.3 Zásobovací systém abraziva .....	11
2.1.4 Rozvodní vysokotlaké potrubí .....	12
2.1.5 Systém na úpravu vody .....	13
2.1.5.1 Mechanická úprava vody.....	13
2.1.5.2 Chemická úprava vody.....	15
2.1.6 Řezná hlavice .....	15
2.1.7 Souřadnicový stůl .....	16
2.1.8 Odpadová nádrž .....	17
2.2 PROFIL NÁSTROJE .....	18
2.2.1 Čistý vodní proud.....	18
2.2.1.1 Kontinuální vodní proud .....	18
2.2.1.2 Kryogenní vodní proud .....	19
2.2.1.3 Kavitační vodní proud.....	19
2.2.2 Směsný vodní proud.....	19
2.2.2.1 Hydroabrazivní proud.....	19
2.3 CHARAKTERISTIKA PROCESNÍCH PARAMETRŮ .....	21
2.3.1 Technologické faktory .....	22
2.3.1.1 Rychlost posuvu.....	22

2.3.1.2 Zdvih .....	23
2.3.1.3 Úhel sklonu .....	24
2.3.1.4 Tloušťka materiálu .....	26
2.3.1.5 Počet přechodů .....	26
2.3.2 Abrazivní faktory .....	27
2.3.2.1 Hmotnostní tok abraziva .....	27
2.3.2.2 Tvrdost abraziva .....	27
2.3.2.3 Velikost a tvar abrazivních zrn .....	27
2.3.3 Hydraulické faktory .....	29
2.3.3.1 Tlak kapaliny a čerpadla .....	29
2.3.3.2 Průměr vodní trysky .....	30
2.3.4 Směsné faktory .....	30
2.3.4.1 Průměr a délka zaostřovací trubice .....	30
2.4 TECHNICKÉ MOŽNOSTI AWJ .....	31
2.4.1 Výsledná kvalita povrchu .....	31
2.4.2 Typy obráběných materiálů .....	33
2.4.2.1 Kovy .....	33
2.4.2.2 Dřevo, plasty a měkké materiály .....	34
2.4.2.3 Keramika, dlažby, kámen a sklo .....	34
2.4.3 Aplikace v procesu obrábění .....	35
2.4.4 Výhody a nevýhody při použití obrábění vodním paprskem .....	37
2.4.4.1 Výhody .....	37
2.4.4.2 Nevýhody .....	37
<b>3. EXPERIMENTÁLNÍ METODIKA A VLASTNÍ MĚŘENÍ .....</b>	<b>39</b>
3.1 DEFINOVÁNÍ PROBLÉMŮ SOUČASNÉHO STAVU AWJ A NÁVRH ŘEŠENÍ ....	39
3.2 TECHNOLOGICKÉ PARAMETRY EXPERIMENTU .....	40
<b>4. VÝSLEDKY EXPERIMENTU .....</b>	<b>46</b>
4.1 SADA VZORKŮ A .....	47
4.1.1 FFT Analýza vzorků A .....	50

4.2 SADA VZORKŮ B.....	61
4.2.1 FFT Analýza vzorků B .....	64
4.3 SADA VZORKŮ C .....	75
4.3.1 FFT Analýza vzorků C .....	78
4.4 SADA VZORKŮ D .....	89
4.4.1 FFT Analýza vzorků D .....	92
4.5 VÝBĚR PARAMETRŮ PROCESU .....	104
4.6 VÝZNAMNOST FAKTORŮ OVLIVŇUJÍCÍCH MĚŘENOU HODNOTU .....	112
<b>5. NÁVRH NA VYUŽITÍ VÝSLEDKŮ.....</b>	<b>114</b>
<b>6. ZÁVĚR.....</b>	<b>120</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>125</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK.....</b>	<b>132</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ .....</b>	<b>133</b>
<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>142</b>



## SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ, SYMBOLŮ A ZKRATEK

ZNAČKA	VÝZNAM	JEDNOTKA
$m_a$	hmotnostní tok abraziva	$[g \cdot min^{-1}]$
$v$	rychlost posuvu	$[mm \cdot min^{-1}]$
$p$	odvozená jednotka tlaku megapascal $10^6 [Pa]$	$[MPa]$
$d_f$	průměr abrazivní trysky	$[mm]$
$d_0$	průměr vodní trysky	$[mm]$
$d_p$	průměr částice	$[mm]$
$l_F$	délka abrazivní trysky	$[mm]$
$z$	zdvih	$[mm]$
$t$	tloušťka materiálu	$[mm]$
$\varphi_p$	úhel sklonu	$[^\circ]$
$n_p$	počet přechodů	$[-]$
$\mu$	jednotka délky - Micro $10^{-6}$	$[\mu]$
$s_p$	směr posuvu	$[^\circ]$
$H_a$	tvrdost abraziva	$[N \cdot mm^{-2}]$
$s_a$	směr přívodu abraziva	$[^\circ]$
MESH	jednotka udává počet ok síta na délce 25,4 $[mm]$	$[-]$
LAS	paprsek abrazivní suspenze	$[-]$
$AE_M$	hodnota mediánu signálu akustické emise	$[-]$
$AE_{PTP}$	Peak to Peak hodnota signálu akustické emise	$[-]$

FFT	z angl. Fast Fourier Transformation rychlá Fourierova transformace	[-]
NASA	z angl National Aeronautics and Space Administration	[-]
AWJ	z angl. Abrasive Water Jet, hydroabrazivní vodní paprsek	[-]
WJM	z angl Water Jet Machining, řezání vodním paprskem	[-]
ASJ	z angl. Abrasive Suspension Jet, abrazivní suspenzní paprsek	[-]
AE	z angl. Acoustic emission, akustická emise	[-]
EDM	z angl. Electric Discharge Machining, elektrojiskrové obrábění	[-]
LBM	z angl. Laser beam machining, laserové řezání	[-]
PBM	z angl. Plasma Beam Machining, plazmové řezání	[-]
EBM	z angl. Electron Beam Machining, obrábění pomocí svazků elektronů	[-]
3D	z angl. 3-dimensional , trojrozměrný prostor (osy x, y a z)	[-]
PTP	z angl. Peak To Peak, "od vrcholu k vrcholu" - max. amplituda	[-]

## CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem této diplomové práce je návrh řešení nepřímého způsobu on-line měření kvality povrchu pomocí akustické emise:

K dosažení cílů této diplomové práce je nutnost realizovat:

1. Rozbor vývoje a teoretických poznatků o technologii AWJ.
2. Analýzu současného stavu řešené problematiky.
3. Definování nedostatků a návrh řešení problému.
4. Experimentální metodiku a experimentální ověření:
  - vyjádřit závislost signálů hydroabrazivního obrábění na základě:
    - analýzy amplitud pro jednotlivé zkoumané úseky, kde cílem je vyhledávání úseků, na nichž dochází ke stabilnímu či nestabilnímu řezu
    - analýzy FFT pro jednotlivé zkoumané úseky, kde cílem je vyhledávání periodických poklesů či nárůstů amplitud tak, aby jsme mohli dále tyto jevy s určitou pravděpodobností předpovídat.
    - porovnání hodnot  $AE_M$  a  $AE_{PTP}$  při různých technologických parametrech.
  - analýza průběhu signálů akustické emise, porovnání jejich změn na začátku, v průběhu a na konci procesu obrábění. Stanovení kde je signál stabilní.
  - získání regulačních rovnic z průběhů hodnot  $AE_M$  a  $AE_{PTP}$  a jejich následná aplikace do procesu on-line řízení technologie AWJ.
5. Návrh na využití výsledků.

# 1. VÝVOJ A ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU AWJ A WJM

## 1.1 VÝVOJ

V této oblasti nekonvenční technologie obrábění WJM je skrytý velký potenciál. Jedná se o technologii, která však není doposud komplexně prozkoumána a kvantifikována. Hydroabrazivní obrábění se v současné době progresivně vyvíjí a přizpůsobuje novým směrům a požadavkům zákazníků.

Nutnost prohloubení znalostí u tzv. nekonvenčních způsobů obrábění je ten, že se v současnosti vyskytuje přes 55 tisíc konstrukčních materiálů.<sup>69</sup> Moderní slitiny se vyznačují zejména specifickými vlastnostmi odolávající vysokým fyzikálním, chemickým a mechanickým působením vnějších vlivů, kde obrábění konvenčními metodami selhává a je neefektivní, či dokonce není možné.<sup>1</sup>

První zmínky o použití WJM jsou z doby před 5 500 lety, kdy se vodní proud využíval k oddělování stříbra a hlušiny v Egyptě<sup>63</sup>

Později v době velké Římské civilizace byla tato technika zlepšena tak, že se dosahovalo uměle generovaného tlaku pomocí speciálních nádob, umístěných na výše položených místech. Když byla nádrž plně naplněna, byla vypouštěna přes speciální otvor, a pomocí uzavřeného dopravního systému byla směřována na požadované místo. Využívání energie vodního proudu se začalo používat na přemísťování materiálu do níže položených míst, kde surovina mohla být lépe dále zpracovávána.<sup>1</sup>

Použití WJM v moderních dějinách sahá do období 1870, kdy Kalifornští zlatokopové využívali tuto technologii při odstraňování vrstev písku a kamení.<sup>1</sup> Tato technologie, byť vylepšená, se použila v zlatých dolech Jižní Afriky, kde byla používána jako médium k přenosu vytěžené horniny.<sup>68</sup>

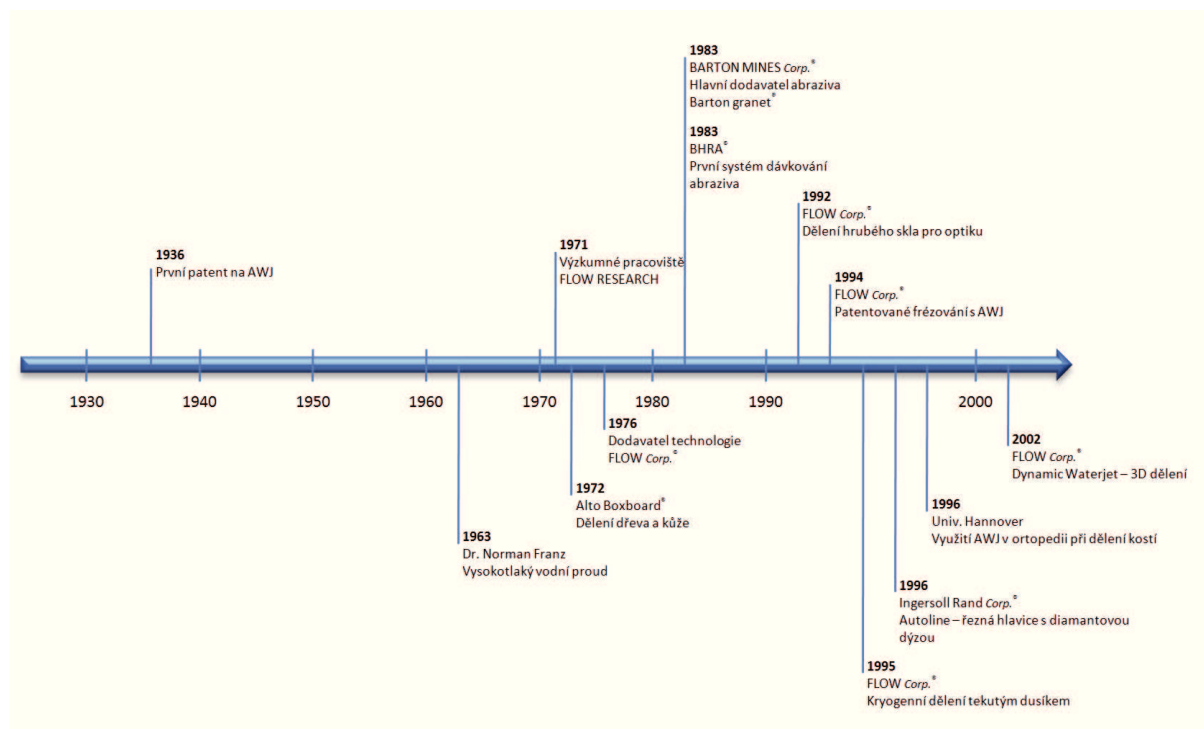
Průmyslové použití technologie řezání vodním paprskem v principu, jakém jej známe dnes je z období 60-tých let. Profesor Norman Franz. a jeho kolegové v USA zkoumali vysokotlaké působení vodního proudu a zjistili, že lze s relativně malým poškozením obráběného povrchu obrábět dřevěné produkty s vysokými rychlostmi posuvu. Problémem zůstával fakt, že je zde potřeba velmi vysokých tlaků (s ohledem na tehdejší dobu) a teprve za pomoci McCartney Manufacturing Company® zhotovili funkční prototyp pro WJM s tlakem do 400 Mpa.<sup>1</sup>

Další aplikace, tentokrát již v komerční sféře následovala v roce 1971, kdy byl poprvé WJM použit při dělení papíru jako alternativa k konvenčně známým způsobům obrábění.<sup>62</sup> Následné použití se datuje na rok 1972, kdy ve firmě Alto Boxboard došlo k vývoji technologie vodního řezání jako nového nástroje pro výrobní průmysl.<sup>1</sup>

V následujícím období nastal ohromný pokrok, o který se zejména zasloužil Dr. Mohamed Hashish tím, že do vodního proudu přidal jemné abrazivo. Toto se stalo základním pilířem, který posloužil k rozšíření této metody, protože nyní po přidání abraziva bylo možno obrábět mnohem tvrdší a pevnější materiály.<sup>66, 67</sup>

V roce 1974 se začala o hydroabrazivní obrábění zajímat Americká organizace pro letectví a kosmonautiku NASA. V té době řešila problém s technologií obrábění keramických tepelných štítů pro raketoplány a v tehdejší době neexistovala technologie, která by daný problém dostatečně vyřešila. Jádrem problému bylo složení keramických segmentů Reinforced Carbon-Carbon, který byl navíc potažen speciální tavnou vrstvou, která musela odolávat teplotám do 1 300°C. Po následujících 6 let byla technologie testována a její výsledek byl představen v roce 1980, kdy se též začalo s průmyslovou sériovou výrobou zařízení, využívající vodní proud s přidáním abraziva pro obrábění. Výsledná technologie byla schopna obrábět téměř všechny známé typy materiálů.<sup>57</sup>

Vznik reálné technologie hydroabrazivního obrábění následovala v roce 1981, kdy se začal hledat co neefektivnější proces úběru v závislosti se vzrůstajícím tlakem na ekologičnost výroby. Prosazeno AWJ bylo v oblasti soustružení i frézování a postupným zdokonalováním se používá v počítačově řízeném obrábění (CAD obrábění).<sup>1</sup>



Obr. 1.1 Vývoj technologie vysokorychlostního hydroabrazivního proudu<sup>2</sup>



## 1.2 SOUČASNÝ STAV VÝVOJE AWJ

První teoretické práce zabývající se hydroabrazivním obráběním se zaměřovali na matematicko-fyzikální podstatu řezného procesu.<sup>7, 3, 4</sup> Další práce se zabývaly praktičtější částí, kde předmětem zkoumání byly první pokusy o nastavení vstupních parametrů, jako je tlak čerpadla, rychlost posuvu, zdvih a samozřejmě kontrola výstupné jakosti obrobeného povrchu.<sup>8, 9, 55</sup> Následovali práce zaměřené na kvalitu povrchu. Toto bylo zkoumáno s ohledem na fakt, že "starší" resp. konvenční metody dosahují oproti hydroabrazivnímu obrábění lepší drsnosti, potažmo celkové kvality povrchu.<sup>6, 33</sup> Zkoumána byla topografie povrchu a příčiny nerovností, jenž na něm vznikly, byl taktéž popsán postup samotného měření s upozorněním na časté chyby, které se při měření povrchu vyskytují.<sup>8, 55, 56</sup>

V nedávné minulosti začal výzkum o využívání on-line integrovaných energeticko-monitorovacích metodách při procesu obrábění.<sup>5</sup> Jiné práce naopak hovoří o akustické emisi jako o faktoru, který je škodlivý a je nutno ho eliminovat.<sup>70, 71, 72</sup>

Práce<sup>3, 57, 59, 61, 64</sup> však považují akustickou emisi jako velký přínos do on-line monitorování a řízení procesu řezání. Bylo zjištěno, že pomocí akustické emise či vibrací je možno sledovat proces obrábění za pomoci snímačů. Pomocí tohoto způsobu můžeme regulovat řezné podmínky přímo v průběhu obrábění a výsledkem by měla být pozitivně ovlivněna kvalita a přesnost obrobených ploch.<sup>3</sup>

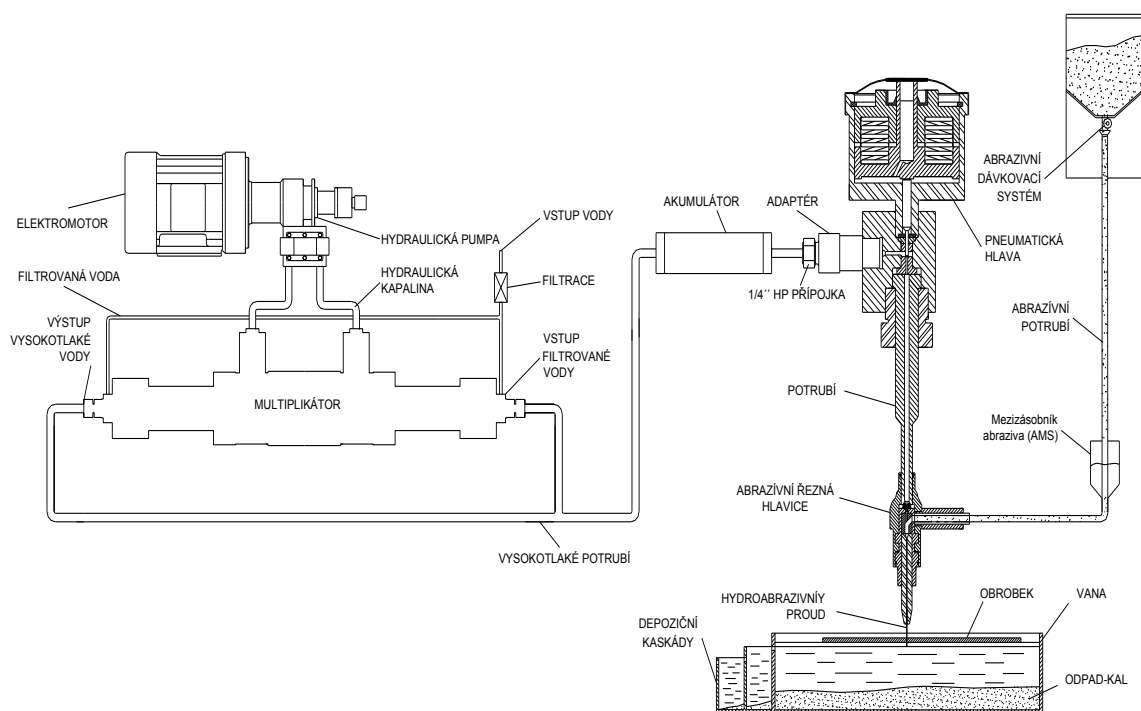
Trendy vývoje hydroabrazivního obrábění:<sup>5</sup>

- mikroabrazivní paprsek,
- pulzní paprsek,
- dělení "kapalným" plynem (paprsek se posléze vypaří),
- dělení pomocí ultravysokých tlaků 700 [MPa] a výše (bez použití abraziva),
- dělení v plynné atmosféře (inertní plyny),
- přesné dělení,
- aplikace v letectví a medicíně.

## 2. TECHNOLOGIE AWJ A WJM

### 2.1 TECHNOLOGICKÁ SOUSTAVA PRO AWJ A WJM

Technologický proces obrábění čistým vodním paprskem a s příměsí abraziva se zařízení liší výrazným způsobem. Hlavním rozdílem je, že AWJ je doplněno dávkovacím systémem abraziva, které vchází přes mezizásobník do řezné hlavičky. Na Obr. 2.1 je schematické znázornění soustavy pro obrábění systémem AWJ. V následujících kapitolách se seznámíme s jednotlivými částmi celé soustavy.



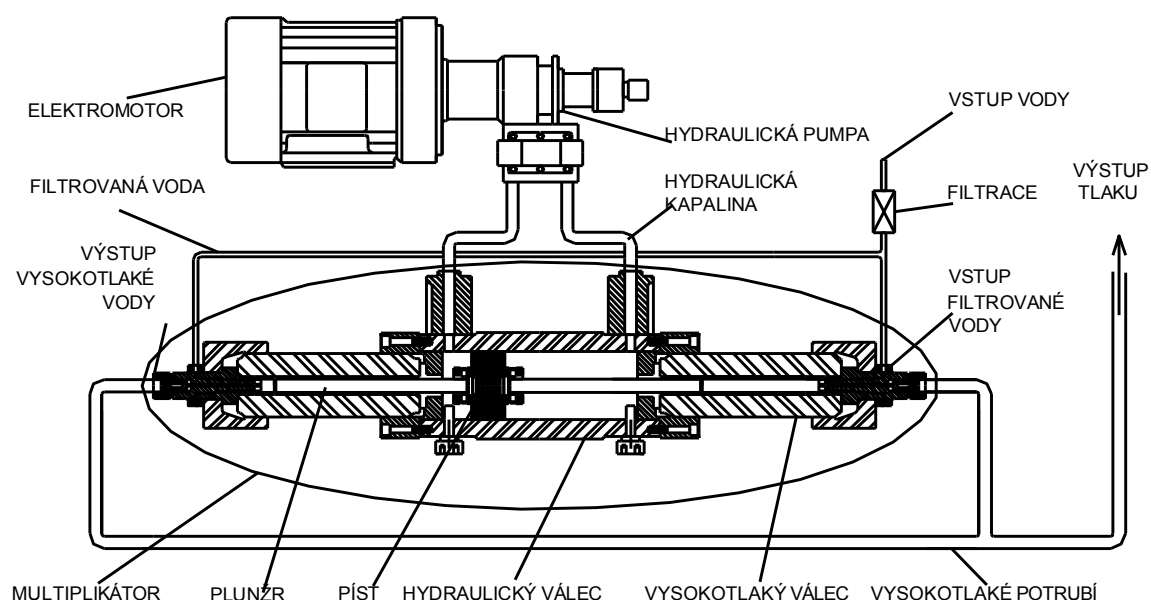
Obr. 2. 1 Technologická soustava pro AWJ <sup>1</sup>

#### 2.1.1 Hydraulické čerpadlo

Aby systém AWJ a WJM mohl spolehlivě obrábět vysokotlakým paprskem, tak je potřeba vyvinout vysoký tlak, ten nám vytváří buďto pístové kompresory (do 270 [MPa]) či hydraulické kompresory (do 400 [MPa]). V této části se budeme zabývat hydraulickými kompresory z důvodu vyšší využitelnosti oproti méně výkonným pístovým kompresorům.<sup>1, 3</sup>

Vysokotlaké čerpadlo tvoří vodní čerpadlo, elektromotor, hydraulická pumpa a multiplikátor. V minulosti a stále i v současnosti se v některých zemích místo multiplikátoru používá triplexový plunžr. Ten však původně sloužil k odstraňování vrstev okují a nečistot. Jeho nevýhodou a taktéž důvodem malého využití bylo, že toto zařízení nebylo schopno generovat tlaky vyšší jak 200 [MPa]. V současné době dosahují tyto čerpadla až 350 [MPa]

Multiplikátor se skládá z nízkotlakého a vysokotlakého okruhu. Nízkotlaký okruh pracuje pod tlakem cca 30 [MPa] a reguluje vysokotlaký okruh, který dosahuje výsledného tlaku kapaliny  $300 \div 700$  [MPa]. Průtok vody je v rozsahu  $1,9 \div 12,7$  [ $\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$ ] a závisí na výkonu, který může být od  $19 \div 150$  [kW].<sup>39</sup>



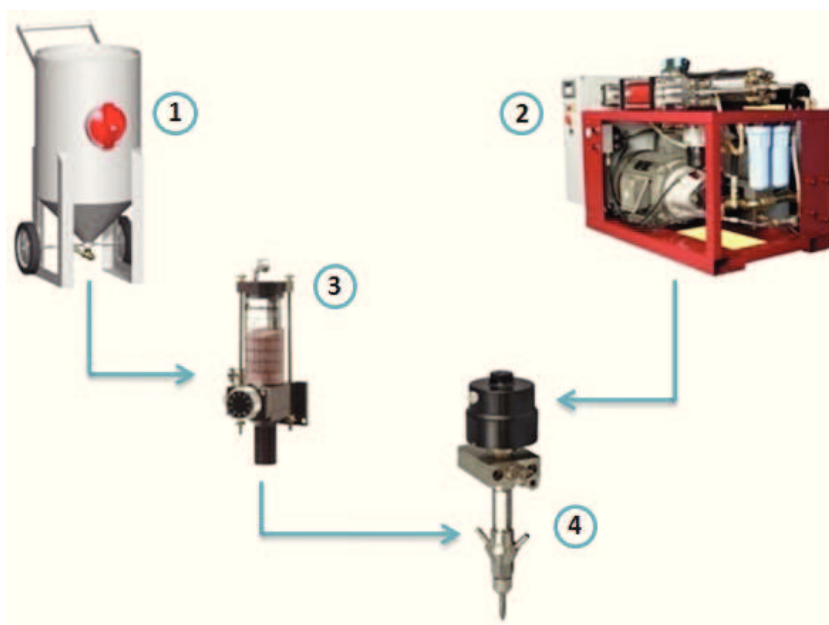
Obr. 2.2 Schéma hydraulického multiplikátoru <sup>1</sup>

### 2.1.2 Akumulátor tlaku

Po multiplikátoru musí být vždy použita vysokotlaká nádoba zvaná akumulátor tlaku. Vlivem rázů vznikajících při výstupu z čerpadel vznikají pulzy, které jsou pro samotný proces obrábění nepřijatelné. Akumulátor nám zajišťuje jednak rovnoměrný tlak procesního média a zároveň udržuje konstantní rychlost proudění.<sup>40</sup>

### 2.1.3 Zásobovací systém abraziva

Při AWJ se systém skládá z velkokapacitního zásobníku abraziva (1) z kterého putuje abrazivum do odměřovacího zásobníku (3). Odtud předem navolenou sytostí dále putuje do řezného nástroje, kde dochází ve směsné komoře ke smíchání s kapalinou. Druhý systém dopravuje abrazivum z vysokotlakého čerpadla (2), kde se abrazivní částice smíchávají s vysokotlakou vodou v tlakové směsné nádobě, do řezné hlavy (4). Tento systém nazýváme proudem abrazivní suspenze LAS a dosahujeme s ním vyšší produktivity. Schéma je zobrazeno na Obr. 2.3 <sup>7, 41</sup>



Obr. 2.3 Přívod řezného média do řezného nástroje <sup>41</sup>

#### 2.1.4 Rozvodní vysokotlaké potrubí

Pro dopravu kapalin se používá systém složený z vysokotlakých hadic a vysokotlakých trubek.

Při působení vyšších tlaků používáme rozvodní systém složený z vysokotlakých armatur - kapilár (Obr. 2.4) , vyrobených z vysokopevnostní korozivzdorné oceli. Nejčastější průměr potrubí je  $6 \div 14$  [mm]. Životnost potrubí je ovlivněna zejména pracovním tlakem a jeho rázy, použitým materiálem, a tepelným a mechanickým napětím. Cyklus výměny s ohledem na životnost či poškození oproti vysokotlakým hadicím je řádově mnohem vyšší. <sup>4, 6</sup>



Obr. 2.4 Vysokotlaké potrubí <sup>43</sup>

Vysokotlaké hadice (Obr. 2.5) se používají u nižších tlaků a jsou vyrobeny ze syntetické pryže odolné vůči oleji a vysokopevnostního ocelového drátu. Ten je součástí hadice ve čtyřech až osmi spirálových vložkách v závislosti na velikosti pracovního tlaku. Vrstvy jsou vůči sobě vinuty opačným směrem a mezi nimi samotnými je pryžová mezivrstva, čím je zajištěna ještě vyšší pevnost. Na vysokotlaké hadice jsou kladeny vysoké nároky a musí mimo jiné splňovat i odolnost vůči vysokým teplotám, odolnost proti cyklickým tlakovým rázům, požadavky na těsnost soustavy a zohlednit bezpečnostní hledisko. K poškození vysokotlakých hadic může dojít zejména působením vyšších provozních tlaků, než je předepsáno výrobcem a nebo mechanickému poškození nejčastěji při opakujícím se kontaktu s jiným předmětem. Z tohoto důvodu většina vysoce namáhaných tlakových hadic má předepsanou životnost v provozních hodinách a po jejím překročení by mělo dojít k výměně.



Obr. 2.5 Šestivrstvá vysokotlaká hadice <sup>42</sup>

## 2.1.5 Systém na úpravu vody

Veřejně používaná voda obsahuje velké množství cizorodých látek, které by z dlouhodobějšího hlediska by negativním způsobem ovlivňovali proces obrábění. Docházelo by k usazování pevných částic a tím k rozsáhlé tvorbě vodního kamene a zrychlené oxidaci kovových součástí. Vodu upravujeme mechanicky, kdy prochází přes systém filtrů a dále chemickým způsobem změkčování či demineralizace.<sup>46</sup>

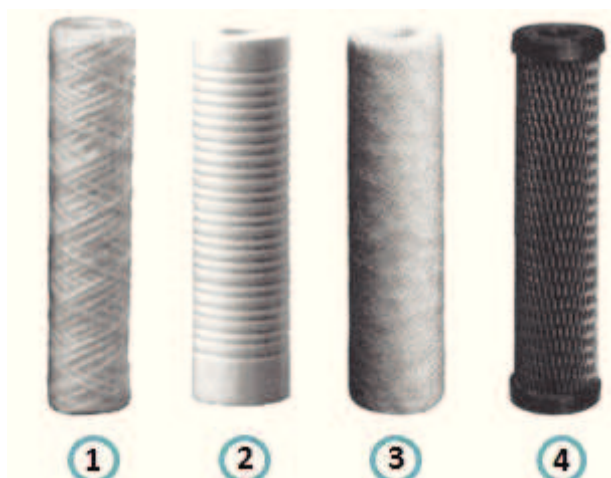
### 2.1.5.1 Mechanická úprava vody

Filtrací dochází k odstranění mechanických nečistot v rozsahu od  $1,2 \div 0,05$  [ $\mu\text{m}$ ]. Používají se tři nebo čtyř zónové filtrační zařízení, kdy u prvního stupně je propustnost 10 [ $\mu\text{m}$ ] a u posledního 0,5 [ $\mu\text{m}$ ] <sup>46, 47, 48</sup>



Materiály filtračních vložek: <sup>44</sup>

- 1) **Bavlna** - přírodní nebo syntetická příze je navinuta pod tlakem na filtrační jádro. Tento typ filtru splňuje požadavky na velmi dobrou kvalitu a průběh filtrace. Odstranění drobného písku, rzi a pevných částic.
- 2) **Syntetická celulóza** - Syntetická látka je formována do předem vytvořeného obrazce a potom po spojení s polymerní pryskyřicí se uchyťí na filtrační jádro. Vložky jsou formovány na tvar s drážkami, které přidávají funkční plochu. Poskytuje široké spektrum možností filtrace částic.
- 3) **Polypropylen** - Označený též polypropylenové hedvábí či lisovaný polypropylen. Filtry vyrobené převážně ze syntetických vláken, které jsou formovány na filtrační jádro. Tento typ vložek je odolný vůči běžným chemickým látkám, efektivně odstraňuje pevné částice.
- 4) **Kompozitní** - Tyto typy kazet obsahují aktivní uhlí, které spolu se syntetickou tkaninou působí jako mechanický filtr a adsorpční filtr k odstranění chloru a jiných znečišťujících látek, jako jsou organické chemikálie. Tato konstrukce je mnohem ekonomičtější, jako mechanický filtr.
- 5) **Keramika** - Tento typ filtru je vyroben z pálené keramiky a je určen pro použití filtrace velmi jemných nečistot a usazenin. Jednou z výhod tohoto typu zásobníku je, že se může recyklovat, tím jsme schopni odstranit větší vrstvu usazenin a vložka může být následně uvedena zpět do provozu.



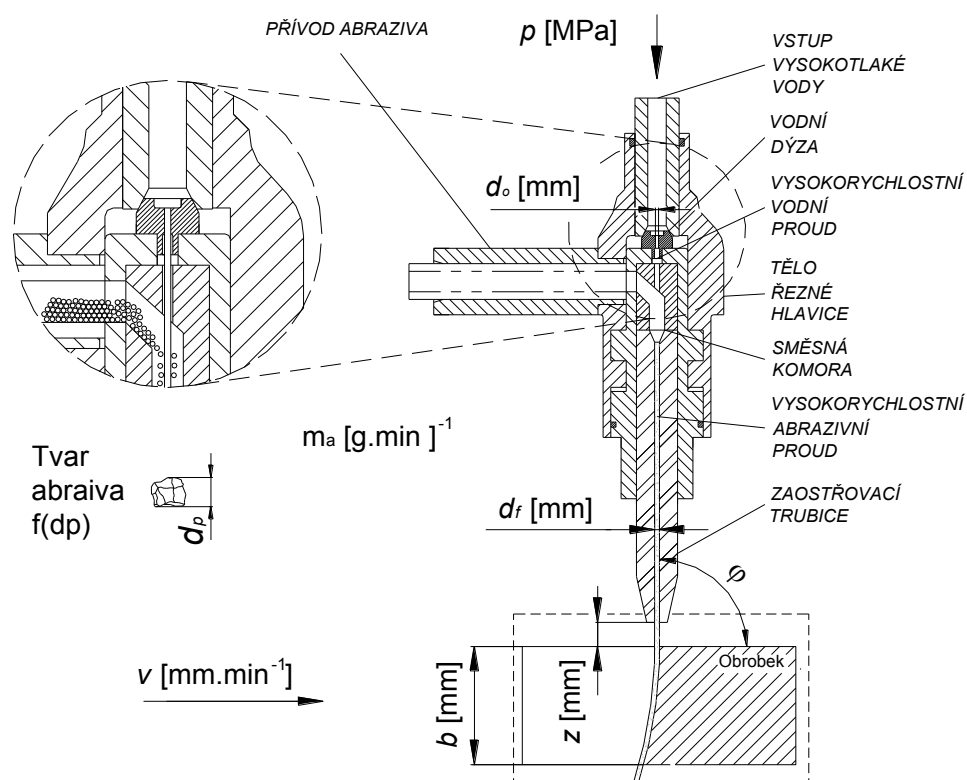
Obr. 2.6 Druhy filtračních vložek <sup>45</sup>

### 2.1.5.2 Chemická úprava vody

Procesem demineralizace se rozumí proces, kdy dochází k odstraňování solí z vody iontovou výměnou. Takto upravená voda se používá taktéž v kosmetickém, farmaceutickém, chemickém a elektro průmyslu.

### 2.1.6 Řezná hlavice

V řezné hlavici (Obr. 2.7) dochází ke konečnému formování vodního či hydroabraivního proudu a je jednou z nejdůležitějších součástí celé soustavy. Řízení řezné hlavice je zajištěno CNC technologií, s možností uchycení na robotickou jednotku. Řezné hlavice jsou předmětem neustálého vývoje, snažícímu se definovat proces turbulencí, ke kterému dochází ve směsné komoře.<sup>1, 2, 6</sup>



Obr. 2.7 Schéma řeznou hlavici<sup>1</sup>

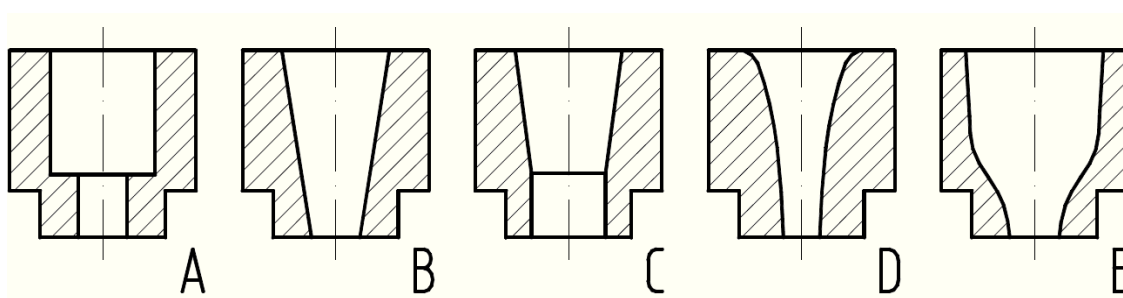
Zvláště při vysokých rychlostech proudění v kombinaci s vysokými tlaky dochází ke ztrátám vlivem tření a tím ke zvyšování teploty kapaliny procházející tryskou.

Tab. 2.1 Nárůst teploty v závislosti na působícím tlaku

Tlak působící v zaostřovací trubici [MPa]	50	100	150	200	250	300	350	400
Zvýšení teploty v zaostřovací trubici [°C]	32	41	50	58	69	77	82	86

Součástí řezných hlavíc jsou zaostřovací trysky, tyto zaostřovací trubice se vyrábí ve velmi malých rozměrech a zásadním parametrem, který ovlivňuje správnou funkci této trubice, je dodržení její souososti. Materiál použitý na výrobu je velmi rozsáhlý, např. korozivzdorné oceli, karbidy wolframu, slinuté karbidy, nitridy bóru nebo také rubín, safír či syntetický diamant.

Další důležité parametry jsou geometrický tvar, výstupní průměr vodní trysky a předpokládaná životnost. Vodní paprsek proudí do trysky velkou rychlostí od  $250 \div 1400 \text{ [m}\cdot\text{s}^{-1}]$  při vnitřním průměru od  $0,05 \pm 0,5 \text{ [mm]}$ .<sup>6, 37</sup>



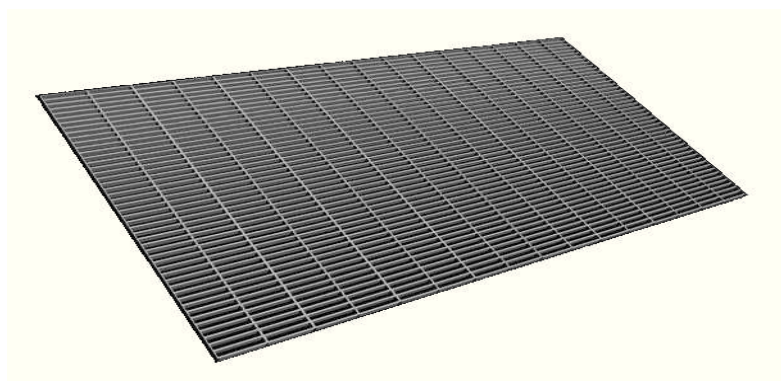
A - válcová, B - kuželová, C - kombinovaná, D - kónická, E - bikubická

Obr. 2.8 Tvary zaostřovacích trubic<sup>6, 37</sup>

### 2.1.7 Souřadnicový stůl

Základem celého systému je souřadnicový stůl (Obr. 2.10), kde upevňujeme obráběné dílce. Výroba probíhá automaticky a je řízena systémem CAD/CAM. V současné době je též možnost 5-ti osého obrábění, kde v této oblasti probíhá mnoho výzkumů a experimentů. Souřadnicové stoly bývají tuhého charakteru a jsou vyráběny z korozivzdorného materiálu s ohledem na vysokou oxidační zátěž.<sup>4</sup>

Rozměry stolů jsou vyráběny o různých velikostech od  $1 \times 1 \text{ [m]}$  až  $6 \times 9 \text{ [m]}$  Pracovní plochu tvoří kuličkový povrch nebo opěrný rošt. (Obr. 3.97)<sup>51</sup>



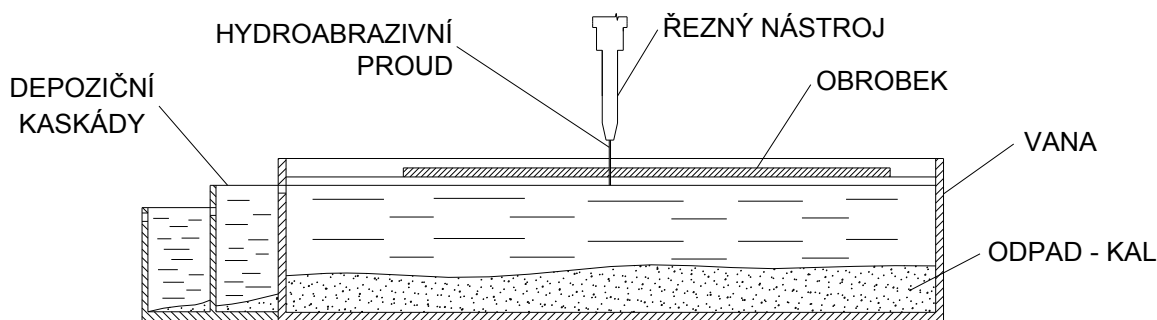
Obr. 2.9 Opěrný rošt



Obr. 2.10 Souřadnicový stůl série Mach 4 od firmy Flow® International Corporation

### 2.1.8 Odpadová nádrž

Součástí souřadnicového stolu je odpadová nádrž, která je umístěna pod opěrným roštěm, a slouží k zachycení řezného paprsku a plní též tlumící funkci. Akustická emise dosahuje při samotném procesu obrábění nadlimitních hodnot dosahujících přes 100 [dB] a proto je nutné, aby obsluha dodržovala bezpečnostní pokyny. Aby byla zaručena správná funkčnost pohlcovací nádrže, tak musí splňovat určitou hloubku v závislosti na používaném pracovním tlaku kapaliny. Hloubka nádoby bývá v rozmezí 300 ÷ 600 [mm]. Při vyšších tlacích s kombinací s plytkou nádobou se do nádrže umísťují ocelové kuličky. Použité abrazivo zachycené v těchto nádržích lze recyklovat a použít v procesu obrábění opětovně, avšak jeho účinnost je výrazně nižší.<sup>4, 6</sup>



Obr. 2.11 Odpadová nádrž<sup>1</sup>

## 2.2 PROFIL NÁSTROJE

Z hlediska technologie použití obrábění vodním paprskem je důležité specifikovat hlavní druhy vodních proudů: <sup>1</sup>

### A. Čistý vodní proud

- a) vodní proud o pokojové teplotě (WJM/VP)
- b) kryogenní vodní proud
- c) kavitační vodní proud

### B. Směsný vodní proud

- a) hydroabrazivní proud (AWJ)
- b) proud abrazivní suspenze (ASJ)

### 2.2.1 Čistý vodní proud

#### 2.2.1.1 Kontinuální vodní proud

Jedná se o použití veřejné vody, která prochází přes systém filtrů, změkčuje se či demineralizuje. Též z níž ve většině případů bývají odstraněny minerály. Tento typ nástroje se používá zejména tam, kde není zapotřebí obrábět tvrdé, případně tlusté materiály. (např. guma, papír, potraviny, léky apod.). Případné zvýšení řezného výkonu dosáhneme přidáním druhého paprsku do místa řezu. <sup>1</sup>

Atributy obrábění čistou vodou: <sup>18</sup>

- Velmi malé ztráty materiálu způsobeny řezáním,
- velmi přesná geometrie,
- možnost obrábění i silnějších materiálů,
- schopnost obrábět měkké a lehké materiály až do tloušťek 100 [mm],
- velmi tenký řezný nástroj,
- nedochází k tepelnému ovlivnění obráběného materiálu,
- relativně vysoká řezná rychlost,
- velmi nízké řezné síly,
- nepřetržitý provoz,
- jednoduché uchycení.



### 2.2.1.2 Kryogenní vodní proud

Tento typ vodního proudu nelze aplikovat ve velkém množství případů. Avšak v lékařském či potravinářském průmyslu právě tento typ řezného nástroje nachází relativně velké množství uplatnění. Kryogenní vodní proud vzniká tak, že se do proudu vody přimíchají ledové krystalky a výsledný řezný nástroj disponuje výrazně efektivnější schopností úběru materiálu. Výsledná teplota je pod  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tato oblast použití kryogenního vodního proudu v průmyslu je však stále využívána spíše ve specifických oblastech a to zejména proto, že existuje mnoho nekontrolovatelných a nepředvídatelných faktorů, které jsou předmětem probíhajících výzkumů.<sup>1</sup>

### 2.2.1.3 Kavitační vodní proud

Kavita je v podstatě dutina plynu obalená kapalinou, v tomto případě vzduchová kapsa obalená vodou. Většina literatur či výzkumů staví kavitaci jako vedlejší efekt, který je potřeba odstranit kvůli jeho negativním vlivům. Existuje však mnoho aplikací, kde je tento jev využíván s velkými pozitivy jako například ve stomatologii k odstraňování zubního kamene, dále při odstraňování ledvinových kamenů, čištění malých předmětů či špatně přístupných míst (např. u šperků) a v neposlední řadě právě u obrábění vodním paprskem.<sup>20</sup>

Zajímavostí je, že ač je to metoda efektivnější, tak ke svému působení potřebuje tlaky mnohem nižší jak klasické obrábění vodním paprskem (do 100 MPa). Vyšší efektivita při nižších tlacích je však vykoupena horší přesností, díky nepravidelnému sloupci bublin dopravovaného do místa řezu a možností používat tento způsob obrábění jen na omezenou pracovní vzdálenost.<sup>3</sup>

## 2.2.2 Směsný vodní proud

### 2.2.2.1 Hydroabrazivní proud

Hydroabrazivní paprsek se liší od čistého vodního paprsku v několika ohledech. U vodního paprsku proud vody (do 1 100 [m/min]) materiál "nahlodává", zatímco u hydroabrazivního obrábění slouží vodní paprsek jako médium k urychlení abrazivních částic, které následně rozrušují materiál. Brusná síla hydroabrazivního obrábění je řádově stonásobně silnější než erozivní síla vodního paprsku. Každé z těchto způsobů obrábění má však své uplatnění.<sup>19</sup>

Vodní paprsek se používá na řezání měkkých materiálů, zatímco hydroabrazivní obrábění se používá zejména tam, kde je materiál tvrdý či velmi silný jako je například keramika, kompozit, kámen, kovy a podobně.<sup>19</sup>

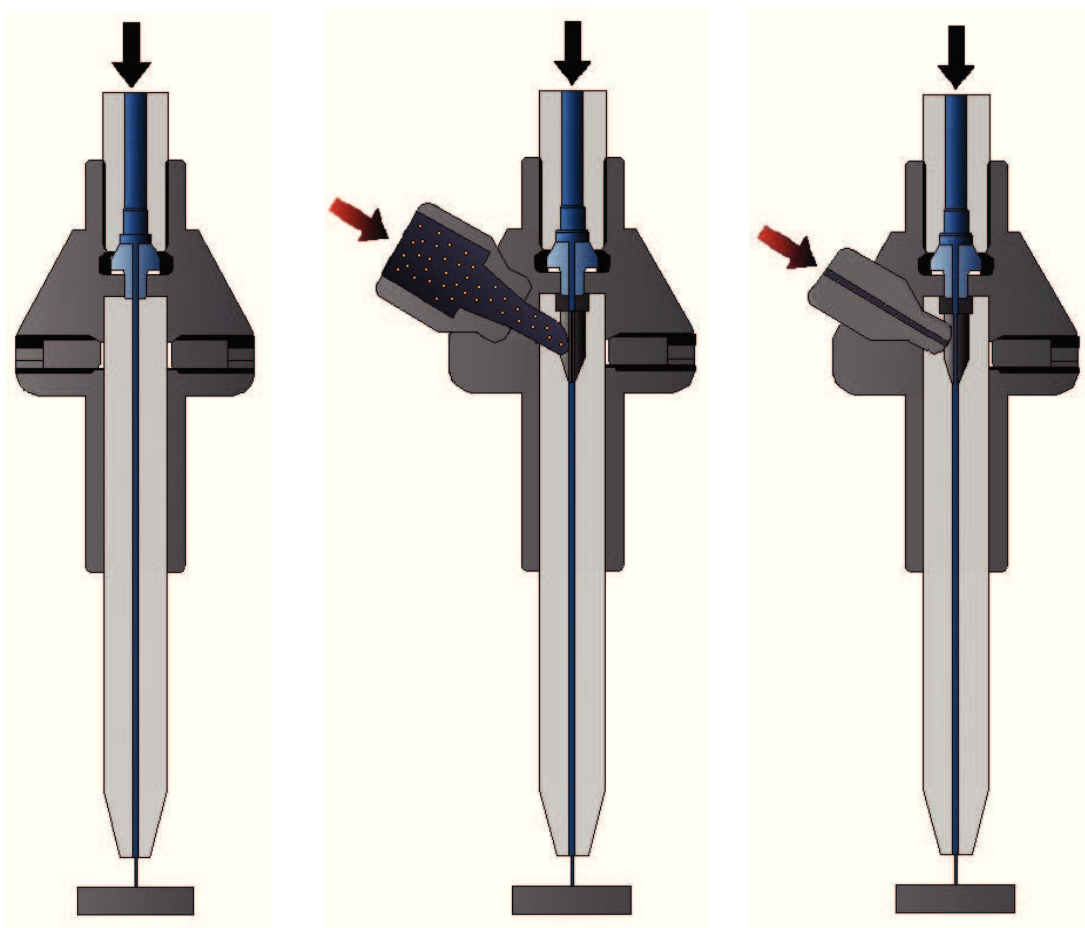
Hydroabrazivní obrábění dále dělíme podle způsobu výroby řezného média:<sup>3</sup>

a) hydroabrazivní proud - AWJ

ke smíchávání abrazivních částic dochází ve směšné komoře, odkud jsou strhávány velkou rychlostí vody. K urychlení směsi dochází přes vodní dýzu a zaostřovací trubici. Viz Obr. 2.13

b) proud abrazivní suspenze - LAS

zde se abrazivní částice smíchávají s vysokotlakou vodou v tlakové směšné nádobě mimo řezný nástroj a takto upravená suspenze se přivádí do vodní dýzy. Viz Obr. 2.14



Obr. 2.12 Obrábění bez abraziva<sup>21</sup> Obr. 2.13 Obrábění s abrazivem  
technologií AWJ<sup>21</sup> Obr. 2.14 Obrábění s abrazivem  
technologií LAS<sup>21</sup>

## 2.3 CHARAKTERISTIKA PROCESNÍCH PARAMETRŮ

Pro úspěšnou aplikaci vodního paprsku v praxi je předpokladem vhodná kombinace parametrů a veličin, které výrazným způsobem ovlivňují kvalitu obrobené plochy.

Jako nejdůležitější technologické parametry se uvádí posuvová rychlost řezné hlavy, hmotnostní tok abraziva a tlak vodního sloupce. Dále však do procesu obrábění zasahuje mnoho dalších faktorů, které se v důsledku mohou významným způsobem podílet na výsledné kvalitě obrobené plochy. Optimálních výsledků v závislosti na tloušťce řezu, druhu aplikovaného abraziva, požadované kvalitě obrobené plochy, průměrů abrazivní a vodní trysky a druhu obráběného materiálu dosáhneme nastavením vhodných technologických parametrů. Další parametry, jako je rychlost řezné hlavy, tlak vodního sloupce či hmotnostní tok abraziva si pak ve většině případů řídicí systém navolí automaticky.<sup>4,1</sup>

Podle autora<sup>38</sup> dělíme faktory, které ovlivňují výslednou kvalitu obrobené plochy na dvě skupiny a to přímé a nepřímé procesní faktory. Do první skupiny patří přímé faktory, pomocí kterých je vytvářený počáteční nástroj. (tab. 2.2)

Tab. 2.2 Přímé faktory<sup>38</sup>

Faktory	Druh	Označení	Jednotka SI
Technologické	Rychlost posuvu	$v$	$[m \cdot s^{-1}]$
	Zdvih	$z$	$[mm]$
	Úhel sklonu	$\varphi_p$	$[^\circ]$
	Tloušťka materiálu	$t$	$[mm]$
	Počet přechodů	$n_p$	$[-]$
	Směr posuvu	$s_p$	$[^\circ]$

Do další skupiny nepřímých faktorů uvedené v tab. 2.3 ovlivňujících kvalitu počátečního nástroje patří: abrazivní, hydrodynamické a směsné. Tyto faktory charakterizují kvalitu a energetickou hodnotu hydroabrazivního proudu.

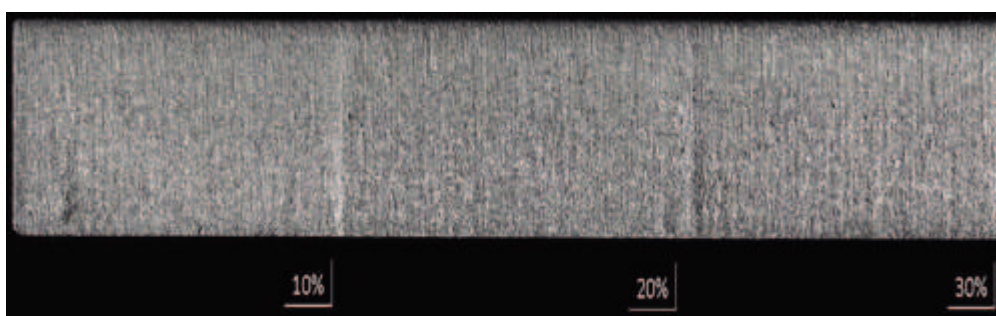
Tab. 2.3 Nepřímé faktory<sup>38</sup>

Faktory	Druh	Označení	Jednotka SI
Abrazivní	Hmotnostní tok	$m_a$	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
	Tvrdość abraziva	$H_a$	$[\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}]$
	Velikost abrazivních zrn		$[-]$
	Tvar abrazivních zrn		$[-]$
	Průměr částice	$d_p$	$[\text{mm}]$
Hydrodynamické	Tlak kapaliny	$p$	$[\text{MPa}]$
	Tlak čerpadla	$p$	$[\text{MPa}]$
	Průměr vodní trysky	$d_0$	$[\text{mm}]$
Směsné	Délka abrazivní trysky	$l_F$	$[\text{mm}]$
	Průměr abrazivní trysky	$d_f$	$[\text{mm}]$
	Směr přívodu abraziva	$s_a$	$[\text{°}]$

## 2.3.1 Technologické faktory

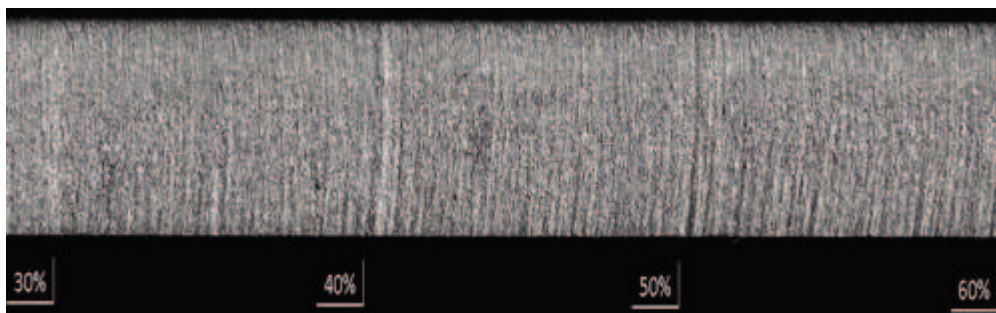
### 2.3.1.1 Rychlost posuvu

Velmi důležitou veličinou vstupující do výsledné kvality povrchu řezu je závislost na řezné rychlosti. U konvenčního obrábění je nastavení optimální řezné rychlosti složitější než u technologie AWJ. Zde se má obecně za to, že při 20 % referenční rychlosti 250  $[\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  by se mělo dosahovat optimální kvality. Z praktických zkušeností se však ukazuje, že kvalita povrchu řezu se do cca 30 % referenční rychlosti v zásadě nemění.<sup>27</sup>

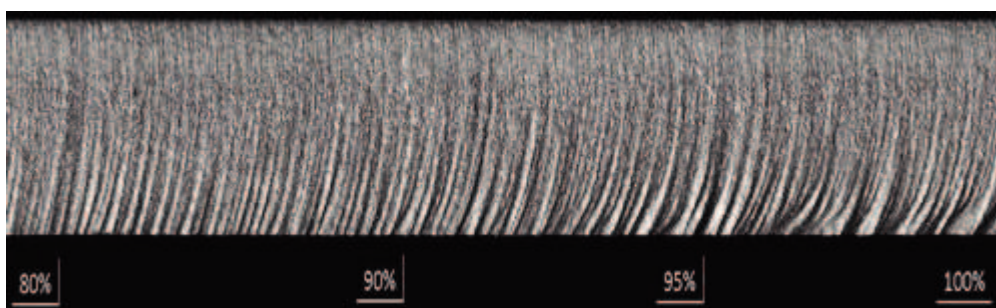


Obr. 2.15 Závislost kvality povrchu na řezné rychlosti 0 ÷ 30 %<sup>24</sup>

Pokud však řezná rychlost přesáhne cca 35 % referenční rychlosti, začíná docházet k poklesu kvality řezu, k velmi výrazným změnám topologie dochází zejména u hodnot vyšších jak 60 % referenční rychlosti.<sup>27</sup>



Obr. 2.16 Závislost kvality povrchu na řezné rychlosti 30 ÷ 60 %<sup>25</sup>



Obr. 2.17 Závislost kvality povrchu na řezné rychlosti 80 ÷ 100 %<sup>26</sup>

Na zřetel musíme brát taktéž fakt, že při velmi nízké rychlosti však dojde nejen k požadovanému prořezu, ale též dochází k přirozenému probroušení materiálu, tento jev je dále vysvětlen v kapitole vznik úkosu.

### 2.3.1.2 Zdvih

Pojmem zdvih je definována vzdálenost od ústí zaostřovací trubice až po povrch obráběného materiálu. Ke změně charakteru a tvaru vodního paprsku však dochází po celou dobu zdvihu, respektive od výstupu řezného média z trysky až po interakci s materiálem.

V první fázi, kdy paprsek vychází z trysky, se chová jako plynulý. V následující fázi nastávají tzv. shluky kapalin, které jsou zapříčinovány zejména rozdíly v rychlosti toků kapalin, kde pomalejší část toku je doháněna rychlejší částí. Na závěr v poslední třetí fázi dochází k rozpadu paprsku na jednotlivé kapky, které v této podobě již nedisponují dostatečnou energií k erozi materiálu. Pro nejlepší kvalitu řezu při obrábění hydroabrazivním paprskem by měla být zachována optimální vzdálenost mezi tryskou a povrchem obrobku mezi 1,0 ÷ 1,5 [mm]. Při vzdálenosti vyšší jak 1,5 [mm] dojde k zaoblení hrany na horní straně řezu.<sup>50</sup>

K tomuto procesu dochází z té příčiny, že vodní proud je nucen překonávat vyšší vzdálenosti a tím ztrácí integritu. Zvětšená výška vyústění má také za následek zvýšení úhlu řezu. Pokud je vzdálenost mezi tryskou a obrobkem větší jak o  $\frac{1}{4}$ , musí být řezná rychlost snížena asi o 20%, aby se dosáhlo podobných kvalitativních výsledků. Automatické řízení výšky je nejspolehlivější a nejpresnější způsob, jak udržet správnou zdvihovou vzdálenost.

Obrázek 2.18 zobrazuje teoretický příklad, že v případě kdy se zdvih trysky zvýší příliš značně, vodní či hydroabrazivní proud nemá dostatek energie, aby mohl plně proniknout materiálem. Obrázek 2.19 znázorňuje experimentální řez ve vzdálenosti 15,2 [mm] 1,9 [mm] na hliníkovém materiálu při zachování konstantní řezné rychlosti. Zejména u prvního řezu dochází k výrazným tvarovým deformacím.<sup>50</sup>



Obr. 2.18 Teoretická závislost výšky obrábění na výsledném tvaru řezného útvaru<sup>50</sup>

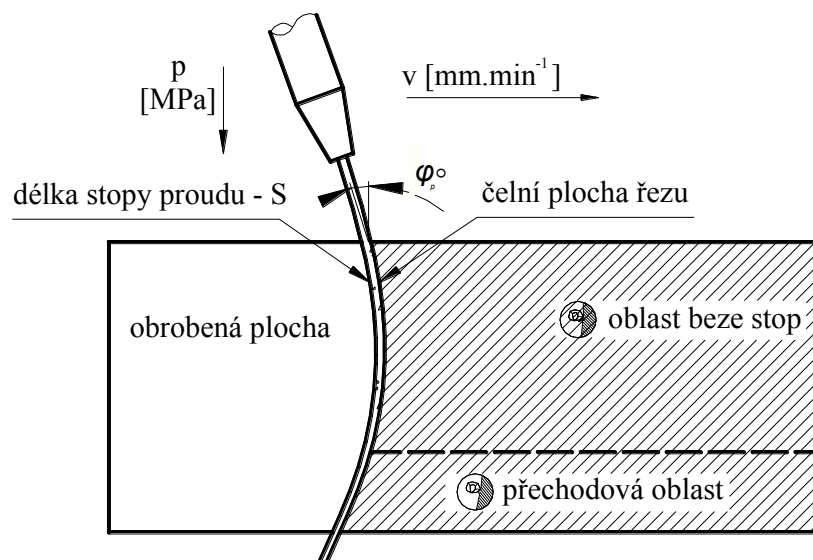


Obr. 2.19 Experimentální závislost výšky obrábění na výsledném tvaru řezného útvaru<sup>50</sup>

### 2.3.1.3 Úhel sklonu

Ve většině případu bývá úhel sklonu nastaven na  $90^\circ$ . Nejnovější studie<sup>30</sup> však hovoří o možnosti změny na  $80^\circ$  či dokonce  $60^\circ$ . Výsledkem má být snaha minimalizovat třetí rýhovanou zónu zobrazenou v předchozích kapitolách.

Obr. 2.20 zobrazuje naklonění řezného nástroje o úhel  $\varphi_p$  kde je zřejmý rozdíl oproti Obr. 2.27 v třetí rýhované zóně.



Obr. 2.20 Naklonění řezného nástroje

Další možností eliminací úkosů je použití systému Dynamic Waterjet® od firmy Flow® International Corporation. Tento systém nabízí vylepšený pohybový mechanismus, který využívá přímé podpory matematického řezného procesu. Základem je zde kloubová hlava, která podle potřeb umožňuje naklánět kloub tak, aby kompenzoval úkos a tím přirozený ohyb paprsku. Rozdíl není jen v rozdílu úkosu, ale též čas cyklu řezání se tímto výrazně snižuje.<sup>29</sup>



Obr. 2.21 Konvenční řezání<sup>29</sup>

Čas cyklu 21 min 23 s

Přesnost (úkos) 0,127 mm



Obr. 2.22 Řezání s DWJ®<sup>29</sup>

Čas cyklu 6 min 27 s

Přesnost (úkos) 0,038 mm



Obr. 2.23 Srovnání technologií<sup>29</sup>

Na Obr. 2.23 je srovnání technologií konvenčního obrábění vodním paprskem a systémem DWJ®. Ve srovnání s přiloženým ocelovým úhelníkem je jasně viditelný rozdíl ve výsledném úhlu.



#### 2.3.1.4 Tloušťka materiálu

S hydroabrazivním paprskem je v současné době možno obrábět různé materiály od fólií až do tloušťek 150 [mm]<sup>11</sup> ( 200 [mm] ).<sup>1</sup> V tloušťkách řezu zejména přes 100 [mm] však rapidně dochází ke snížení kvality řezu. Maximální tloušťka obráběného materiálu je však závislá na požadavcích na kvalitu obráběné plochy, druhu materiálu a nepochybně na strojním zařízení.<sup>2, 86, 93, 96</sup>

Speciálním případem však je oblast gravírování, kde absolutní prořez je nežádoucí a je zde potřeba dosažení pouze určité požadované hloubky. Technologie hydroabrazivního obrábění je schopna gravírovat keramiku, minerály, sklo či jiné materiály. Dosahovaná kvalita povrchu se pohybuje mezi Q4-Q5 a tím začíná konkurovat laserovému gravírování.<sup>30</sup>



Obr. 2.24 Reliéf vytvořený metodou gravírování AWJ<sup>30</sup>

#### 2.3.1.5 Počet přechodů

Při vyšším počtu přechodů dosahujeme při zachování posuvových, tlakových a úhlových podmínkách větší hloubky řezu. Nicméně s každým dalším přechodem klesá přírůstek hloubky kvůli odporu stěn zhoršujícím odvod použité kapaliny a abraziva. Tato "tlumící vrstva" pak brání opětovnému pronikání vodního proudu do hloubky a jeho erozní činnosti.



## 2.3.2 Abrazivní faktory

### 2.3.2.1 Hmotnostní tok abraziva

Tento faktor významným způsobem ovlivňuje průřeznost obráběného materiálu a tím i výslednou kvalitu obrobené plochy. Všeobecně lze konstatovat, že přidáváním abrazivních zrn dosahujeme větších hloubek řezu, avšak až do okamžiku zlomu, kdy začne docházet k velmi častým kolizím abrazivních zrn mezi sebou a tím pádem v samotném proudě klesá kinetická energie proudu. Tento faktor je v současné době cílem experimentálních výzkumů různých institutů či laboratoří.

### 2.3.2.2 Tvrdost abraziva

Vyšší účinnosti při procesu obrábění dosáhneme při použití abraziva s větší tvrdostí. Touto volbou však dochází ke zvýšenému opotřebení vnitřního obvodu zaostřovací trubice. Též tvrdost abraziva je nutno volit s ohledem na obráběný materiál, ne vždy musí vyšší tvrdost abraziva zaručovat vyšší produktivitu či výsledně kvalitativnější povrch jakou u abraziva s nižší tvrdostí.

### 2.3.2.3 Velikost a tvar abrazivních zrn

Mezinárodně uznávanou jednotkou velikosti abraziva je MESH, tato jednotka udává počet ok síta na délce 25,4 [mm] respektive na délce jednoho palce. Velikost a označení abraziva je udávána dle normy ISO 525-75. Pro lepší představu hodnota MESH 80 je velikost zrna cca 180  $\mu\text{m}$ . Zrnitosti dělíme do tří kategorií podle operace, na kterou ji používáme, samozřejmě že existují i další druhy zrnitosti, avšak ve většině případů se používají jen tyto tři druhy.<sup>33</sup>

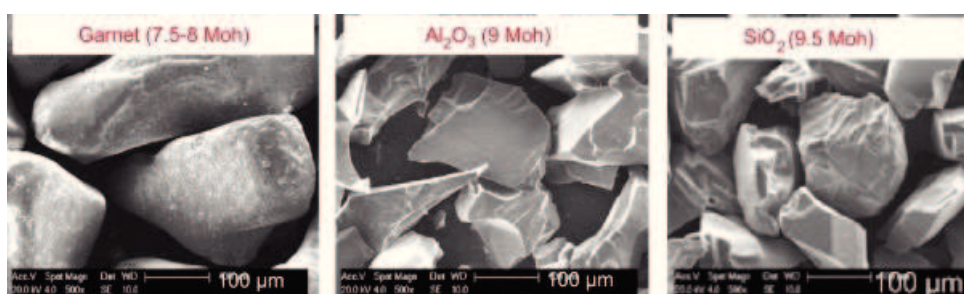
- |            |   |
|------------|---|
| – MESH 120 | použití u dokončovacích operací, velmi hladký povrch      |
| – MESH 80  | všeobecné použití, kvalitativně dobrý povrch              |
| – MESH 50  | použití u hrubých dělicích řezů, velké posuvové rychlosti |

Tvar abrazivních zrn se liší podle typu používaného abraziva, přičemž každý typ abrazivních zrn se vyznačuje svou charakteristickou kulatostí a kruhovitostí. Při použití kulatějších zrn dosáhneme lepší výslednou kvalitu obrobené plochy, ale se znatelně sníženou hloubkou řezu. Obdobně při použití jemnějšího abraziva dosáhneme též lepší topografie povrchu, ale výrazně se nám prodlouží čas potřebný pro obrábění daného materiálu. Rozdíly v tvaru abrazivních zrn jsou vyobrazeny na Obr. 2.25.<sup>4</sup>

Nejčastější formou používaného abraziva jsou různé formy granátu a olivínu jako je například: australský granát, čínský granát, granát barton, norský olivín, bengal bay indický a kefr jet indický. Jako abrazivo však lze použít i krystalky soli či ledu, které se s úspěchem používají v lékařském a potravinářském průmyslu.<sup>1,4</sup>



Obr. 2.25 Abrazivním materiál MESH 80<sup>4, 32</sup>



Obr. 2.26 Srovnání abrazivních částic<sup>31</sup>

Tab. 2.4 Chemický rozbor australského granátu od firmy PTV spol. s r. o.<sup>4, 34</sup>

Chemické složení	hm. objem	Minerální složení	hm. objem
SiO <sub>2</sub>	36 [%]	Granát	97 ÷ 98 [%]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20 [%]	Ilmenit	1 ÷ 2 [%]
FeO	30 [%]	Zirkon	< 0,2 [%]
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2 [%]	Křemen	< 0,5 [%]
TiO <sub>2</sub>	1 [%]	Ostatní	< 0,25 [%]
MnO	1 [%]		
CaO	2 [%]		
MgO	6 [%]		

## 2.3.3 Hydraulické faktory

### 2.3.3.1 Tlak kapaliny a čerpadla

Jak již bylo zmíněno dříve, tak o výrobu tlaku, který je potřeba k řeznému procesu, se používají buďto pístové kompresory (do 270 [MPa]) či hydraulické kompresory (do 400 [MPa]). V současné době však díky použití multiplikátorů dokážeme generovat tlaky až do hodnot 700 [MPa] a nebo též pomocí technologie HyperPressure<sup>TM</sup> od firmy Flow<sup>©</sup> International Corporation tlaky do 650 [MPa] s úsporou abraziva až 50 %. Pomocí vyšších tlaků však dokážeme i zvyšovat řeznou rychlost a tím dosáhnout vyšší produktivity. Za nevýhodu vyšších tlaků se považuje zejména ta skutečnost, že na celou soustavu vlivem vyšších tlaků musíme klást vyšší nároky s ohledem na vyšší opotřebení řezného nástroje, vyššího tlaku v potrubí a pod. Též vzniklé vibrace a akustické emise jsou mnohem vyšších parametrů jak u standardních tlaků a tím jsou nežádoucím prvkem.<sup>1,4,36</sup>

Odvození ideálního tlaku není jednoduché z toho důvodu, že do procesu obrábění vstupuje mnoho proměnných, které specifickým způsobem ovlivňují tento řezný proces. K detailnějšímu popisu vlivu tlaku kapaliny a čerpadla na výslednou topografii povrchu materiálu vytvořenou hydroabrazivním obráběním by byla zapotřebí rozsáhlá experimentální studie, která však není cílem ani obsahem této práce.<sup>3, 4</sup>

Pro výpočet tlaku kapaliny použijeme Bernoulliho rovnici ve tvaru pro nestlačené kapaliny:<sup>35</sup>

$$v^2 = \frac{2p}{\rho} \quad (3.1)$$

$v$  - rychlost proudění kapaliny [m·s<sup>-1</sup>]

$p$  - tlak kapaliny [MPa]

$\rho$  - hustota kapaliny [kg·m<sup>-3</sup>]

Kinetická energie částice:<sup>35</sup>

$$E_K = \frac{1}{2} m v^2 \quad (3.2)$$

$E_K$  - kinetická energie [J]

$m$  - hmotnost částice [kg]

### 2.3.3.2 Průměr vodní trysky

Rozměry, respektive průměr a délka vodní trysky patří k pasivním parametrům, které nelze v procesu obrábění měnit a též výrazným způsobem ovlivňují výslednou kvalitu obrobené plochy. Vysokotlaká voda smíchaná s abrazivem směřuje jako hydroabrazivní proud do zaostřovací trubice určitého geometrického tvaru.<sup>6, 37</sup>

### 2.3.4 Směsné faktory

#### 2.3.4.1 Průměr a délka zaostřovací trubice

Zaostřovací trubicí se rozumí prostor, kde dochází k formování a ohraničování vodního proudu a abrazivních částic do seskupení, těsně před samotným vyústěním z otvoru. Touto snahou a též faktem, že vodní proud odevzdává velkou část své kinetické energie přichozím abrazivním částicím, v kombinaci s narážením (chápejme formováním hydroabrazivního proudu) do stěn zaostřovací trubice vyvolává fakt, že dochází ke ztrátám kinetické energie v hodnotách až 60 % v závislosti na délce použité zaostřovací trubice.

Dalším důležitým faktorem u těchto zaostřovacích trubic je jejich životnost v závislosti na použitém materiálu. Dříve používané trysky byly vyráběny z velmi levného karbidu wolframu, které měly kromě velmi nízké životnosti (jednotky hodin) tendenci k mimořádnému opotřebovávání. V současné době se k výrobě trubic používají kompozitní karbidy o vyšší kvalitě. Levnější varianty mají životnost  $35 \div 60$  hodin a jsou vhodné pro hrubé dělení materiálů, též mohou sloužit pro zaučení nového operátora. Nejlepší zaostřovací trubice mají životnost více jak 100 hodin, možno je používat jak přesnému řezání, tak jak při každodenním pracem.<sup>1, 5, 6</sup>

## 2.4 TECHNICKÉ MOŽNOSTI AWJ

### 2.4.1 Výsledná kvalita povrchu

Všeobecně lze konstatovat, že nejlepší dosahovaná přesnost obrábění se pohybuje řádově v desetinách [mm] (Standardní přesnost řezu je  $\pm 0,1$  [mm /m] a drsnost povrchu  $R_a$  pod 3,2 ),<sup>11, 12</sup> ale při větších hloubkách řezu je přesnost řádově v [mm].<sup>1</sup> Kvality řezu dělíme do 5 stupňů, které jsou zobrazeny v následující tabulce a obrázku 2.28.

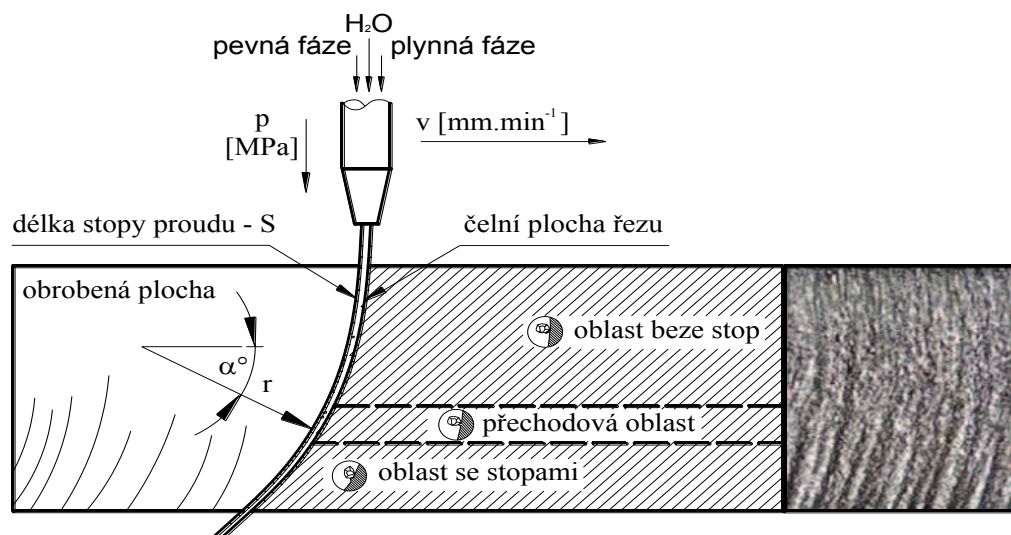
Tab. 2.5 Kvalitativní stupně řezu při technologii obrábění AWJ<sup>17</sup>

Kvalitativní stupně	Charakteristik a řezu	Drsnost $R_a^*$ v horní části řezu	Drsnost $R_a^*$ ve spodní části řezu	Tolerance v horní části řezu [mm]	Tolerance v dolní části řezu [mm]	Tvar úkosu
Q 5	Nejlepší řez	pod 3,2	cca 3,2	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	Žádný, či jen velmi mírný
Q 4	Kvalitní řez	cca 3,2	cca 6,3	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	Minimální
Q 3	Střední řez	cca 4,0	do 12,5	$\pm 0,15$	Dle typu a tloušťky materiálu	Dle typu a tloušťky materiálu
Q 2	Hrubý řez	cca 4,0	do 25	$\pm 0,2$	Dle typu a tloušťky materiálu	Dle typu a tloušťky materiálu
Q 1	Dělicí řez	4,0 ÷ 6,3	do 40	$\pm 0,2$	Výrazně nepřesné	Výrazný úkos

\* zde uvedené hodnoty jsou pouze orientačního charakteru s ohledem na typ materiálu a též v závislosti na tloušťce obráběného materiálu

Po průchodu materiálem vodní paprsek, ať již čistý nebo abrazivní, zanechává stopu, kterou rozdělujeme do následujících tří oblastí: <sup>1, 3, 27</sup>

- a) hladká zóna
- b) přechodová zóna
- c) rýhovaná zóna



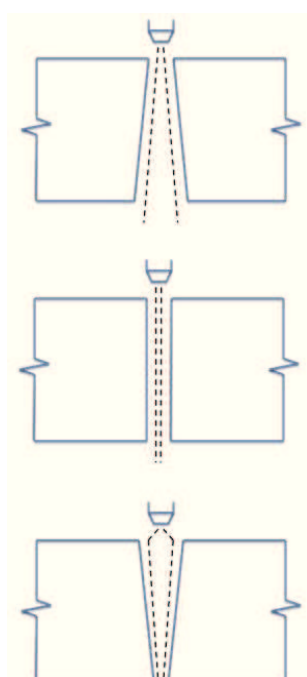
Obr. 2.27 Schematické znázornění oblastí při procesu dělení hydroabrazivním obráběním<sup>2, 28</sup>



Obr. 2.28 Různé kvality řezu při obrábění technologií AWJ<sup>16</sup>

Při použití hydroabrazivního obrábění ve většině případů nastává vznik úkosu. Toto zapříčiňuje zejména působení odporu děleného materiálu vůči hydroabrazivnímu proudu, který se v procesu obrábění nechová jako pevný nástroj. Vzniklá odchylka a její rozsah od kolmé plochy bývá zásadně ovlivněna reznými parametry a zvláště pak typem obráběného materiálu. U tvrdých a tenkých materiálů odchylka nebývá větší jak  $1^\circ \div 1,5^\circ$ <sup>13</sup>, zatímco u měkčích a tlustších materiálů (př. u gumy) může odchylka dosahovat až  $1^\circ \div 7^\circ$ .<sup>1, 38, 96</sup>

Tvar úkosu rozdělujeme do tří základních skupin: <sup>13</sup>



A. "probroušení"

měkký materiál či velmi pomalá posuvová rychlost

B. ideální stopa

rovnováha mezi tloušťkou materiálu a rychlostí řezu

C. "neprobroušení"

Odolný materiál či velmi rychlý řez

Obr. 2.29 Tvary úkosu

## 2.4.2 Typy obráběných materiálů

### 2.4.2.1 Kovy

Technologií AWJ lze obrábět všechny druhy kovových materiálů. Dle strojního vybavení můžeme opracovávat kovové materiály počínaje konstrukčními oceli, přes litinu a ušlechtilé slitiny, dále nerezové materiály až po těžko obrobitelné materiály. Neželezné materiály jako např. mosaz, hliník, bronz, dural, měď a jiné lze též touto technologií velmi efektivně obrábět a to s minimálními přídávky. U těchto materiálů může být dosaženo konečného povrchu samotným vodním či hydroabrazivním paprskem, bez nutnosti následného opracování.<sup>4</sup>

Jak již bylo v předchozích kapitolách uvedeno, tak s hydroabrazivním paprskem je v současné době možno obrábět různé tloušťky materiálů od fólií až do tloušťek 150 [mm] <sup>11</sup> ( 200 [mm] ).<sup>1</sup> V tloušťkách řezu zejména přes 100 [mm] však rapidně dochází ke snížení kvality řezu. Maximální tloušťka obráběného materiálu je však závislá na požadavcích na kvalitu obráběné plochy, druhu materiálu a nepochybně na strojním zařízení.<sup>2, 86, 93, 96</sup>



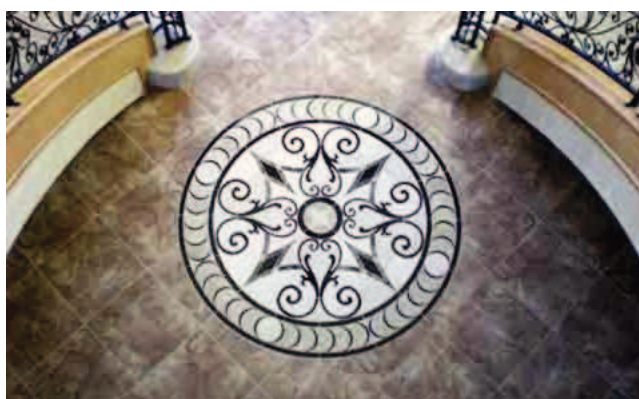
### 2.4.2.2 Dřevo, plasty a měkké materiály

Touto technologií je možno obrábět všechny druhy plastů, plexiskel, bakelitu, pryže, či silon a podobně. Dále je tato technologie schopna obrábět v všechny druhy dřeva, překližky, lamino, dřevotřísky, ale také papír, filc, kůži a jiné textilní materiály, molitan, koberce apod.<sup>4</sup>

### 2.4.2.3 Keramika, dlažby, kámen a sklo

Široké uplatnění nacházíme i v této oblasti. Výhodou je zejména precizní řez s přesností 0,2 mm, kdy lze řezat žulu, mramor, keramiku, umělé kameny, porcelán, slinutou keramiku, a to vše opět v jakýchkoli křivkách řezu. Výsledná kvalita obrábění je srovnatelná s diamantovými nástroji a u materiálů nedochází ke vzniku mikrotrhlin. Použití této technologie nemusí sloužit pouze k dělení stavebních materiálů, ale i k vyřezávání tvarů dekorativních účelů. (Obr. 2.30) Jelikož zde není tepelné zatížení, nedochází k zkreslování výsledného tvaru a ztrátě pevnosti.

Další oblastí, kde se s velkou úspěšností daná technologie uplatňuje, je řezání skla či jiných minerálů. Mechanickou podstatu skla měnit nelze, a proto i zde vždy hrozí určité riziko prasknutí, odštípnutí růžku či jiné komplikace, ale možnosti a úspěšnost jsou nesrovnatelně vyšší než u klasického opracování. Jediné, co skutečně nelze, je řezání kalených skel. Nejproblematictější je prvotní průnik hydroabrazivního proudu, kdy se používají menší tlaky. Řezání je možno i u neprůstředných, barevných, protipožárních, lepených, či jiných skel a to opět v tloušťce až do 100 mm, takže lze snadno vyřezat bankovní přepážky, větrací otvory, schodnice či segmenty tanečních parketů nebo dokonce skleněné nápisy či jiné objekty.<sup>4</sup>



Obr. 2.30 Obráz vytvořený technologií AWJ<sup>53</sup>

Obr. 2.31 Řezání skla technologií AWJ<sup>54</sup>



### 2.4.3 Aplikace v procesu obrábění

Technologie Hydroabrazivního obrábění se v současné době používá v mnoha odvětvích. viz. Tab. 2.6

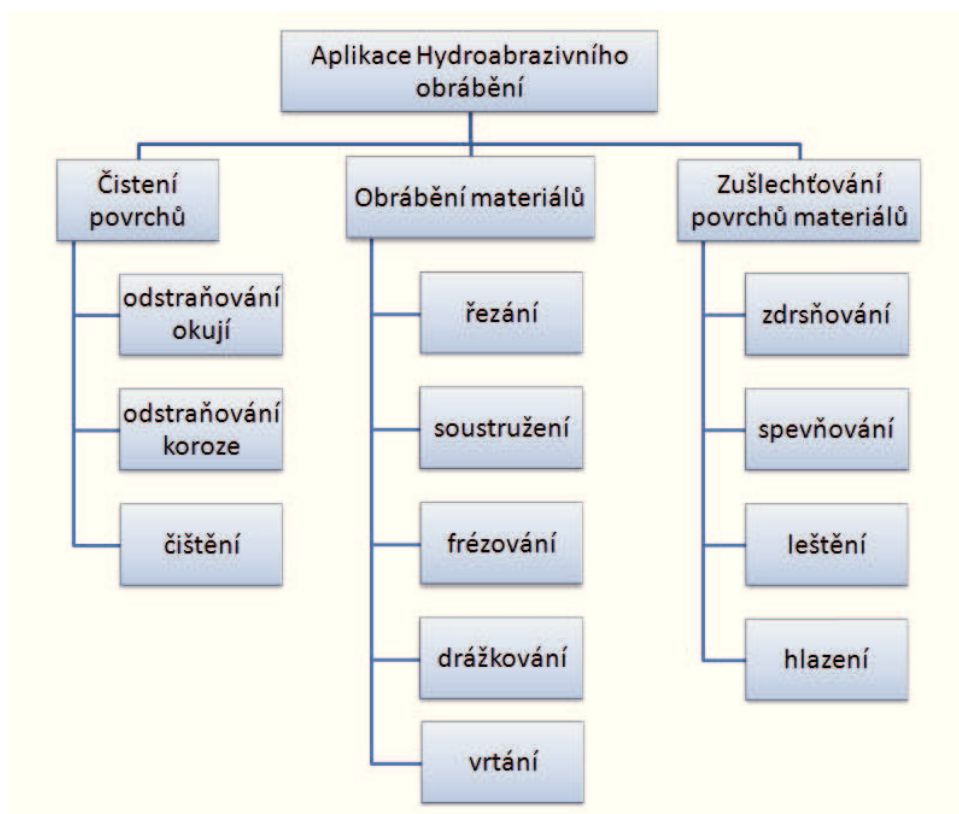
Základní rozdělení lze charakterizovat ve třech skupinách: <sup>2</sup>

- A. Aplikace vodního proudu
- B. Aplikace hydroabrazivního proudu
- C. Outdoorové aplikace

Tab. 2.6 Oblasti aplikace čistého a hydroabrazivního proudu v praxi <sup>20</sup>

<b>A. Aplikace vodního proudu</b>	<b>Oblast použití</b>
dělení plastů	průmysl na zpracování plastů
dělení plastů a celulózy	papírenský průmysl
dělení vláken a textilu	textilní a oděvní průmysl, sportovní potřeby
dělení gumy a kůže	gumárenský průmysl a průmysl zpracující kůži
dělení potravin	potravinářský a cukrárenský průmysl
dělení dřeva	dřevařský a dekorativní průmysl
dělení tuhých paliv, ledu	energetický průmysl
<b>B. Aplikace hydroabrazivního proudu</b>	<b>Oblast použití</b>
dělení Ti, Al, nerezavějící oceli, vysokopevnostní oceli a slitin	letecký, lodní, automobilový průmysl a pod.
dělení skla, drceného a laminovaného skla	sklářský průmysl, dekorace, reklamní předměty
dělení kompozitních materiálů, keramiky, magnetických materiálů	letecký, automobilový, keramický a el. průmysl
dělení stavebního materiálu, betonu	stavební průmysl
dělení vyhořených palivových tyčí	jaderné elektrárny
<b>C. Outdoorové aplikace</b>	<b>Oblast použití</b>
dělení odpadu	
dělení betonu a cementu	Stavební průmysl, demontáže
dělení kamene	těžební průmysl, průmysl na zpracování keramiky
řízené mikrotunelování	stavební průmysl

Dále lze rozdělit Hydroabrazivní obrábění podle funkce, jakou působí na opracováváný materiál: <sup>2</sup>



Obr. 2.32 Aplikace Hydroabrazivního obrábění <sup>2</sup>

Mimo uvedené odvětví je též AWJ uplatněn u života ohrožujících pracích, jako je například razení štol či tunelů, a také pro řezání média, které svým obsahem považujeme za velmi nebezpečné. Při takovýchto aplikacích používáme dálkově řízeného robota, jež nám může přímo v terénu likvidovat munici či plynové bomby v hořících objektech viz. Obr. 2.33 a Obr. 2.34



Obr. 2.33 Robot tEODor® včetně technologie AWJ <sup>15</sup> Obr. 2.34 Řezání tlakové lahve technologií AWJ <sup>15</sup>

## 2.4.4 Výhody a nevýhody při použití obrábění vodním paprskem

### 2.4.4.1 Výhody: <sup>12</sup>

- Kvalitu řezu lze variabilně volit od nejlepší drsnosti Ra do 3,2 až po řez výrazně rýhovaný s velkou drsností, ale s výrazným rozdílem ceny,
- díky studenému řezu nedochází k tepelnému ovlivnění obráběného materiálu a s tím souvisejícím změnám ve struktuře,
- efektivita obrábění při tvarově složitých předmětech a taktéž při kompozitních materiálech, kde konvenční způsoby obrábění selhávají,
- ekologická nezávadnost procesu obrábění. Je zamezeno vzniku zplodin a jedná se o velmi ekologickou výrobu,
- nahrazení mnoha posloupných technologických operací jednou (frézování, vrtání, soustružení...),
- při hydroabrazivním obrábění nedochází k fyzikálním, chemickým ani mechanickým změnám či působením na plochu jinou než právě obráběnou,
- v řezu nedochází k tvorbě mikrotrhlin,
- silové působení řezného média na obráběný materiál je minimální,
- schopnost obrábět jedním strojem / nástrojem nepřebernou škálu materiálů, včetně obtížně obrobitelných,
- využívání společného řezu u menších a středních tloušťek - více materiálu položených na sobě,
- u materiálů, kde již proběhla povrchová úprava (pokovení, leštění,...), lze bez poškození povrchové úpravy provádět obrábění,
- jednoduché obrábění velmi složitých a členitých tvarů (mozaika a intarzování),
- prováděný řez je bez otřepů, následné opracování (odjehlování či srážení ostrých hran) zde není zapotřebí
- výsledná cena u hydroabrazivního obrábění u malosériových či kusových zakázek je nižší jak u konvenčního obrábění.

### 2.4.4.2 Nevýhody: <sup>12</sup>

- Nutnost kontaktu s vodou a tím pádem charakteristiky s tím souvisejícími. (např. delší vysoušení, možnost rychlého působení povrchové či koroze atd.),
- výrobní problém při produkci velmi malých dílců (v řádově do 5 mm),
- jakost povrchu zejména u silných materiálů a částečně i za použití velké řezné rychlosti není po celé ploše řezu kvalitativně stejná. Respektive ve spodní části u výběhu paprsku z materiálu dochází k deformaci kontury obrábění.

Tab. 2.7 Srovnání parametrů nekonvenčních způsobech řezání materiálů 38

Metoda	Hodnotící faktor	Jednotky	Elektrojiskrové řezání		Laserové řezání		Plazmové řezání		Řezání elektronovým paprskem		Řezání hydroabrazivním paprskem	
			EDM		LBM		PBM		EBM		AWJ	
	šířka řezu	[mm]	průměr drátu + 0,02 ÷ 0,05 *		0,02 ÷ 1		až 7 v horní oblasti ve spodní 4,5		0,01		0,3 ÷ 3 podle charakteru řezu	
	min. tloušťka řezaného materiálu	[mm]	0,02		0,5		0,5		0,25		0,05	
	max. tloušťka materiálu řezaného materiálu	[mm]	400		50 (hospodárně 10)		až 150 dle typu a chemického složení materiálu		až 3 dle typu a chemického složení materiálu		až 200	
	šířka paprsku	[mm]	0,03 ÷ 0,35		-		-		-		0,15 ÷ 2,5	
	přesnost rozměrů	[mm]	± 0,001 mm		0,1		nepatří k přesným metodám		-		0,1 - 0,5 podle charakteru řezu	
	rychlost posuvu	[mm·min <sup>-1</sup> ]			až 8 000		50 - 6 000		až 1 200		15 ÷ 1 500	
	drsnot povrchu Ra	[μm]	0,7 ÷ 1,3		3,6 ÷ 12		-		-		2,5 ÷ 40 podle charakteru řezu	
	tepelně ovlivněná oblast	[mm]	0,4 ÷ 1		0,05 ÷ 0,2		0,25 ÷ 1,25		-		není	
	poznámka	-	-		účinnost max. 10%		nepatří k přesným metodám		vybraných parametrů při nekonvenčních		účinnost až 80 %	

### 3. EXPERIMENTÁLNÍ METODIKA A VLASTNÍ MĚŘENÍ

#### 3.1 DEFINOVÁNÍ PROBLÉMŮ SOUČASNÉHO STAVU AWJ A NÁVRH ŘEŠENÍ

Jak již bylo v předchozích kapitolách zmíněno, tak první teoretické práce zabývající se hydroabrazivním obráběním se zaměřovali na matematicko-fyzikální podstatu řezného procesu.<sup>7,3,4</sup> Další práce se zabývaly praktičtější částí, kde předmětem zkoumání byly první pokusy o nastavení vstupních parametrů, jako je tlak čerpadla, rychlost posuvu, zdvih a samozřejmě kontrola výstupné jakosti obrobeného povrchu<sup>8, 9, 55</sup> Následovali práce zaměřené na kvalitu povrchu, kde byla zkoumána jeho topografie a příčiny nerovností, jenž na něm vznikly, byl taktéž popsán postup samotného měření s upozorněním na časté chyby, které se při měření povrchu vyskytují<sup>8, 20, 47, 55</sup>

V nedávné minulosti začal výzkum o využívání on-line integrovaných energeticko-monitorovacích metodách při procesu obrábění.<sup>5</sup> Jiné práce naopak hovoří o akustické emisi jako o faktoru, který je škodlivý a je nutno ho eliminovat.<sup>70, 71, 72</sup>

Práce<sup>3, 57, 59, 61, 64</sup> však považují akustickou emisi jako velký přínos do on-line monitorování a řízení procesu řezání. Bylo zjištěno, že pomocí akustické emise, či vibrací je možno sledovat proces obrábění za pomoci snímačů. Pomocí tohoto způsobu můžeme regulovat řezné podmínky přímo v průběhu obrábění a výsledkem by měla být pozitivně ovlivněná kvalita a přesnost obrobených ploch.<sup>3</sup>

Návrh řešení nepřímého způsobu on-line měření kvality povrchu pomocí akustické emise je následující:<sup>1</sup>

- vyjádřit závislost signálů hydroabrazivního obrábění na základě:
  - analýzy amplitud pro jednotlivé zkoumané úseky, kde cílem je vyhledávání úseků, na nichž dochází ke stabilnímu či nestabilnímu řezu
  - analýzy FFT pro jednotlivé zkoumané úseky, kde cílem je vyhledávání periodických poklesů či nárůstů amplitud tak, aby jsme mohli dále tyto jevy s určitou pravděpodobností předpovídat
  - porovnání hodnot  $AE_M$  a  $AE_{PTP}$  při různých technologických parametrech
- analýza průběhu signálů akustické emise, porovnání jejich změn na začátku, v průběhu a na konci procesu obrábění. Stanovení, kde je signál stabilní
- získání regulačních rovnic z průběhů hodnot  $AE_M$  a  $AE_{PTP}$  a jejich následná aplikace do procesu on-line řízení technologie AWJ

### 3.2 TECHNOLOGICKÉ PARAMETRY EXPERIMENTU

Vznik této studie byl podpořen z projektu VEGA 1/OS72/11 Vědecké grantové agentury. Dále na tomto projektu spolupracovala Fakulta výrobních technologií Technické univerzity v Košicích se sídlem v Prešově (SK), Katedra obrábění a montáže Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava, firma Technická diagnostika s.r.o., Prešov - Ing. Adamčík (SK) a firma DRC s.r.o., Prešov - p. Mikita (SK).<sup>1</sup>

V následujících tabulkách jsou uvedeny technologické parametry experimentu.

Tab. 3.1 Technologické faktory experimentu<sup>1</sup>

Faktory	Označení	Jednotka	Environmentální rozsah
Hmotnostní tok abraziva	$m_a$	$[g \cdot min^{-1}]$	250, 400
Rychlost posuvu	$v$	$[mm \cdot min^{-1}]$	50, 75, 100, 150
Tlak	$p$	$[MPa]$	350
Průměr abrazivní trysky	$d_f$	$[mm]$	0,8, 1,4
Průměr vodní trysky	$d_0$	$[mm]$	0,14
Zdvih	$z$	$[mm]$	3
Tloušťka materiálu	$t$	$[mm]$	15
Úhel sklonu	$\varphi_p$	$[^\circ]$	90
Počet přechodů	$n_p$	$[-]$	1
Typ abraziva	Barton Garnet	$[-]$	-
MESH	-	$[-]$	80

Tab. 3.2 Parametry hydraulického čerpadla Stream Line Pump SL III<sup>1</sup>

Parametry hydraulického čerpadla Stream Line Pump SL III	Jednotka	Environmentální rozsah
Tlak oleje	$[MPa]$	20
Maximální tlak	$[MPa]$	380
Typ násobiče	$[-]$	Dvojčinný
Výkon	$[HP]$	50
Objem tlumiče	$[l]$	2
Tlakový poměr	$[-]$	20:1

Tab. 3.3 Charakteristika obráběného materiálu AISI 309 <sup>52</sup>

<b>Chemické složení obráběného materiálu AISI 309</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Environmentální rozsah</b>
<b>Cr</b>	[%]	22 ÷ 24
<b>Ni</b>	[%]	12 ÷ 15
<b>Mn</b>	[%]	2
<b>Si</b>	[%]	1
<b>C</b>	[%]	0,200
<b>S</b>	[%]	0,030
<b>P</b>	[%]	0,045
<b>Mechanické vlastnosti obráběného materiálu AISI 309</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Chemické složení</b>
<b>Tvrdost</b>	[HRB]	95*
<b>Modul elasticity</b>	[GPa]	200*
<b>Pevnost v Tahu</b>	[MPa]	515*
<b>Mez kluzu</b>	[MPa]	205*
<b>Tažnost</b>	[%]	40*
<b>Poměrné prodloužení</b>	[%]	50*
<b>Poissonovo číslo</b>	[-]	0,27 ÷ 0,3*

\* zde uvedené hodnoty jsou platné při teplotě 25 °C

Tab. 3.4 Enviromentální podmínky experimentu <sup>1</sup>

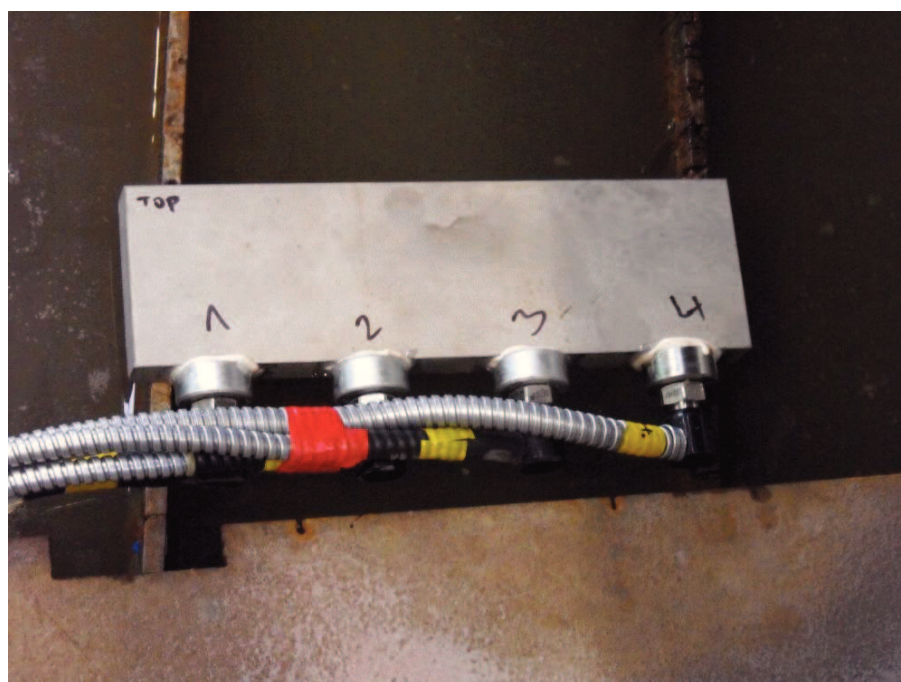
<b>Podmínky experimentu</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Environmentální rozsah</b>
<b>Tlak</b>	[hPa]	1007
<b>Teplota</b>	[°C]	20
<b>Vlhkost prostředí</b>	[%]	80
<b>Nadmořská výška</b>	[m]	280



Předmětem tohoto experimentu je soustava vzorků složená z bloků A, B, C a D. Sada A a sada B byla obráběna novou (neopotřebovanou) zaostřovací trubicí o průměru  $d_f = 0,8$  [mm] a sada C a sada D použitou (opotřebovanou) zaostřovací trubicí o průměru  $d_f = 1,4$  [mm]. Hmotnostní tok abraziva u sad vzorků A a C byl  $m_a = 400$  [g·min<sup>-1</sup>] a u sad B a D  $m_a = 250$  [g·min<sup>-1</sup>]. Rychlost posuvu řezné hlavy se měnila u každé sady vzorku a to na  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>],  $v = 75$  [mm·min<sup>-1</sup>],  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>],  $v = 150$  [mm·min<sup>-1</sup>]. Všechny experimenty se uskutečnily podle technologických parametrů uvedených v Tab. 3.1, Tab. 3.2, Tab. 3.3 a Tab. 3.4, K výše uvedeným údajům nutno dále doplnit, že typ řezné hlavice byl použit Ingersoll Rand - Autolite™.

Celkově bylo vyrobeno 16 vzorků, kde jako proměnné parametry byli stanoveny hmotnostní tok abraziva  $m_a$ , rychlost posuvu řezné hlavy  $v$  a průměr zaostřovací trubice  $d_f$ .

Při experimentu bylo použito hydraulické čerpadlo Stream Line Pump SL III s možností generování maximálního tlaku  $p = 380$  [MPa]. Na vzorky byli umístěny snímače vibrací a na zaostřovací trubicí mikrofon snímající akustickou emisi. Proces experimentálního dělení vzorků je zobrazen na Obr. 3.2.

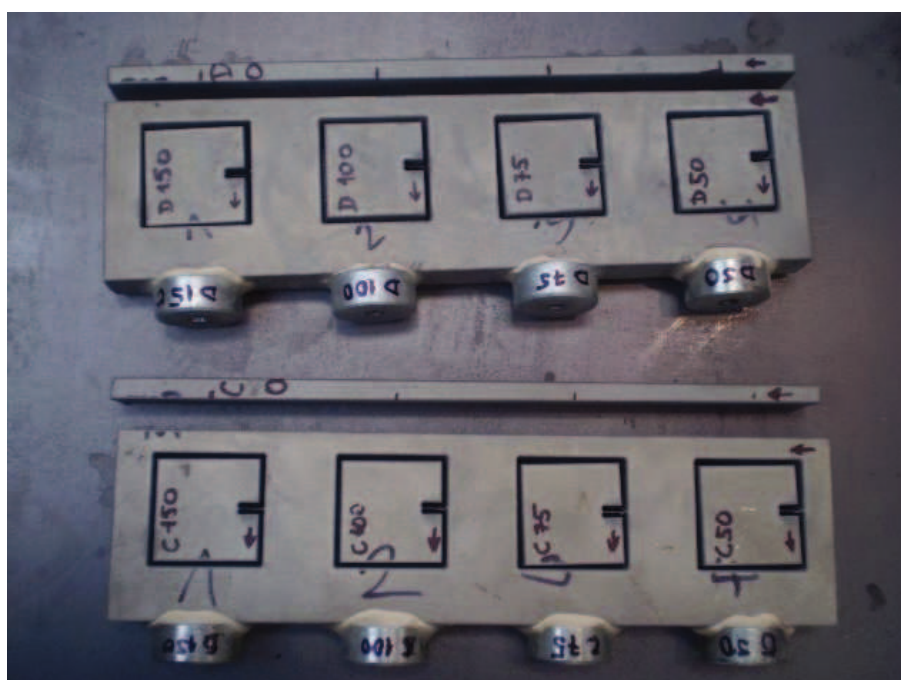


Obr. 3.1 Vzorek před samotným experimentem



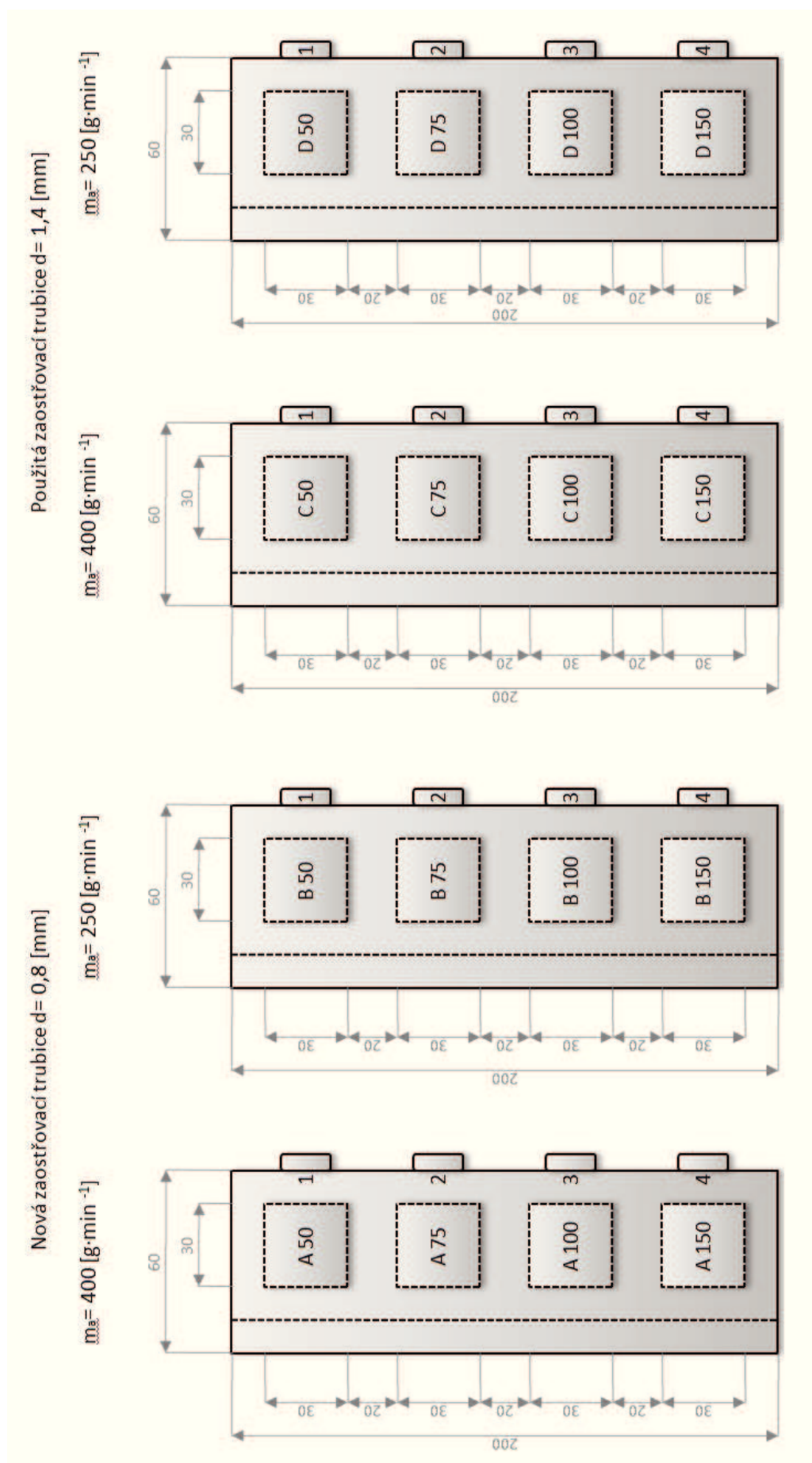


Obr. 3.2 Proces obrábění experimentálního vzorku



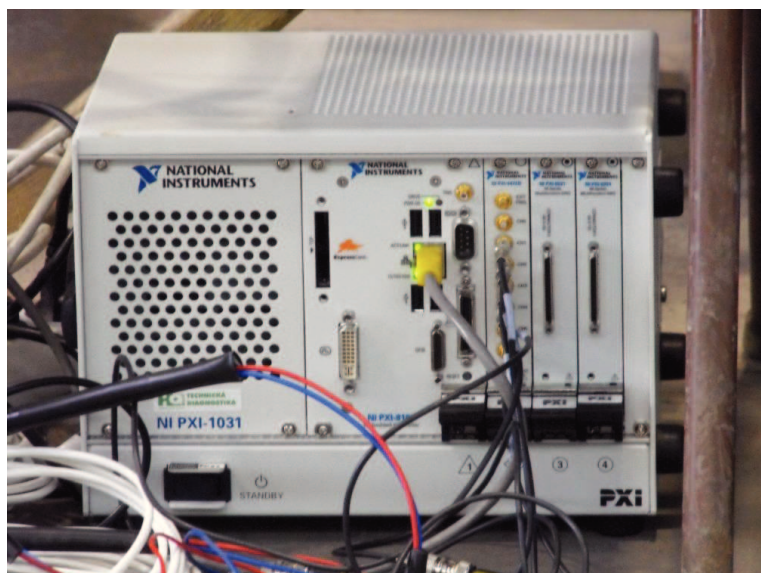
Obr. 3.3 Experimentální vzorky sady C a D po procesu obrábění

Schématické znázornění série experimentů A, B, C a D je vyobrazeno na Obr. 3.4



Obr. 8.4 Sady experimentálních vzorků A, B, C a D

Systém použitý pro sběr dat byl NI PXI - 1031 od firmy National Instruments® (Obr. 3.5) a osmikanálový NI PXI - 6109 s frekvencí 30 [kHz] a vysokou škálou výstupů od totožné firmy. Na kanál 1, kanál 2, kanál 3 a kanál 4 byly připojeny snímače typu "akcelerometer PCB IMI 607 A11". Kanál 7 byl připojen na mikrofon, zbylé snímače využity nebyly a nebylo s nimi dále pracováno.



Obr. 3.5 Systém na sběr dat NI PXI - 1031

Mikrofon umístěný nad zaostřovací trubicí (Obr. 3.6) byl chráněn nejen proti poškození, ale též vůči negativním vlivům, které by mohli nežádoucím způsobem ovlivnit výsledek experimentu. (ochrana vůči vlhkosti, prachu). Zároveň musel ochranný materiál zaručit neovlivňování získaných dat (zvýraznění či pohlcování signálů).



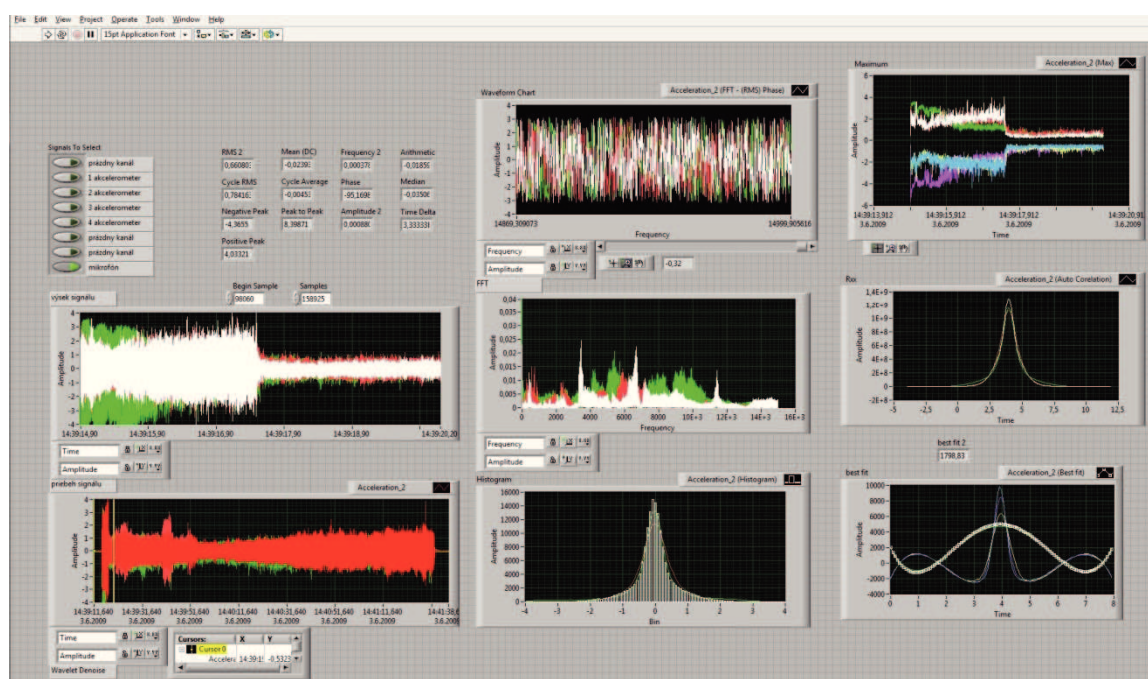
Obr. 3.5 Umístění mikrofonu



## 4. VÝSLEDKY EXPERIMENTU

Získaná data z uskutečněného experimentu byla následně exportována do počítačového programu LabView® 2011 (Obr. 4.1) od již výše zmiňované Americké společnosti National Instruments®. Licence k tomuto softwaru byla poskytnuta Katedrou výrobních technologií Fakulty výrobních technologií Technické univerzity Košice se sídlem v Prešově. (SK)

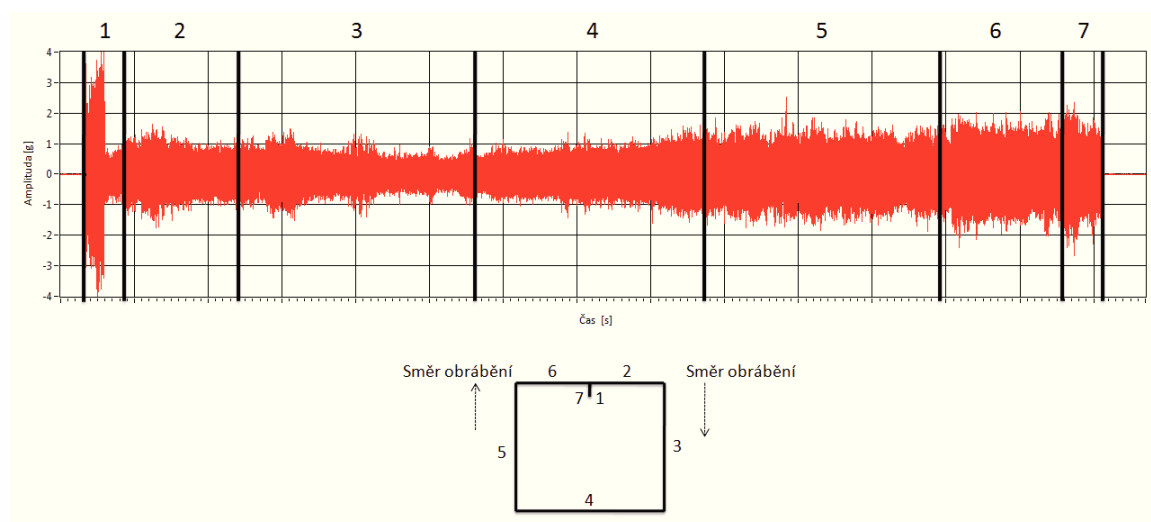
Z osmi signálů se bude v následující kapitole prozkoumávat č. 7 a to "mikrofon", další signály nejsou předmětem této práce a budou předmětem zkoumání jiných navazujících prací.



Obr. 4.1 Počítačové prostředí LabView® 2011 a analýza získaných dat

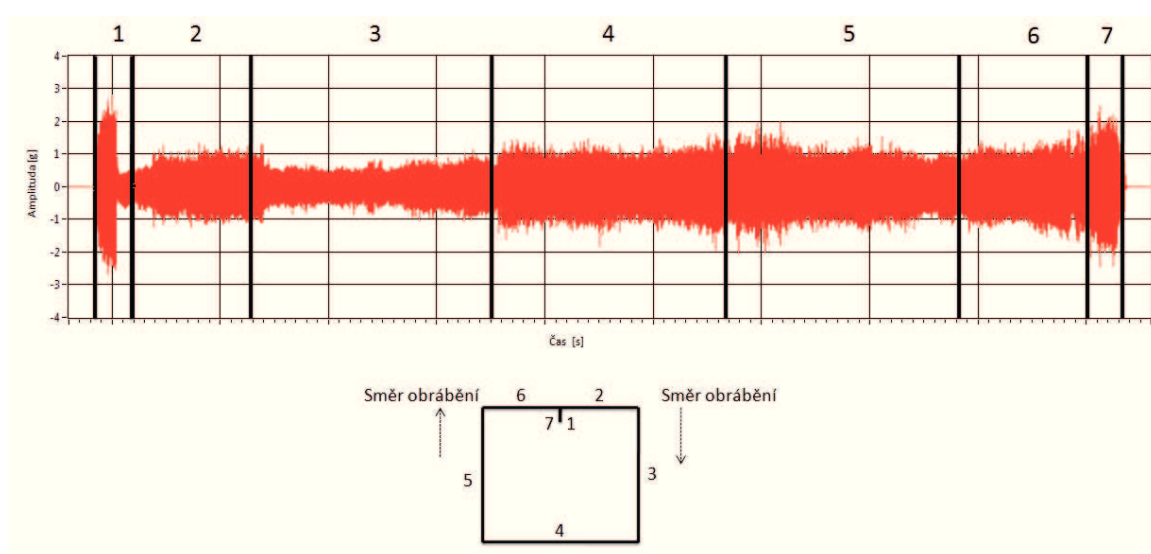
V počáteční fázi experimentu se zaměříme na zkoumání projevů akustické emise v závislosti na proměnné rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $v = 75 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $v = 150 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  a času  $t$ . Zkoumány budou vzorky všech sad, tzn. Sada A, B, C a D. Následující průběhy akustického signálu budou rozděleny podle úseků, kde se provádělo měření.

## 4.1 SADA VZORKŮ A



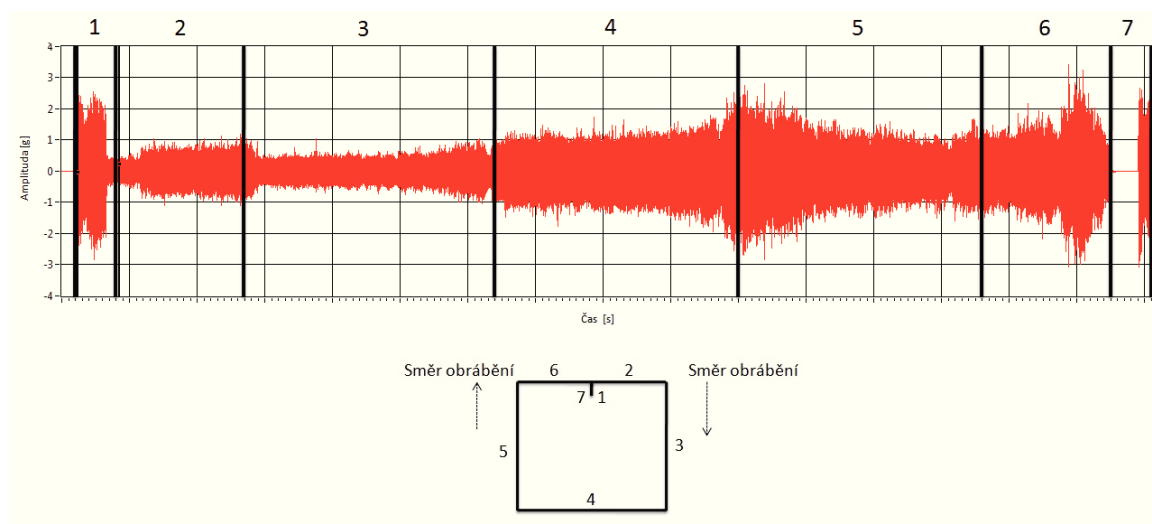
Obr. 4.2 Průběh signálu akustické emise, sada vzorků A, obráběný materiál AISI 309,  $v = 50 [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $p = 350 [\text{MPa}]$ ,  $m_a = 400 [\text{g} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $d_f = 0,8 [\text{mm}]$ ,  $b = 15 [\text{mm}]$

Průběh zobrazený na Obr. 4.2 měl následující nastavení vstupních parametrů: obráběný materiál byl AISI 309, rychlost posuvu řezné hlavy  $v = 50 [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ , generovaný tlak byl  $p = 350 [\text{MPa}]$ , hmotnostní tok abraziva  $m_a = 400 [\text{g} \cdot \text{min}^{-1}]$ , materiál byl obráběn novou (neopotřebovanou) zaostřovací trubicí o průměru  $d_f = 0,8 [\text{mm}]$  a tloušťka obráběného materiálu  $b = 15 [\text{mm}]$ . Použité abrazivo bylo typu Barton Garnet o MESH 80.



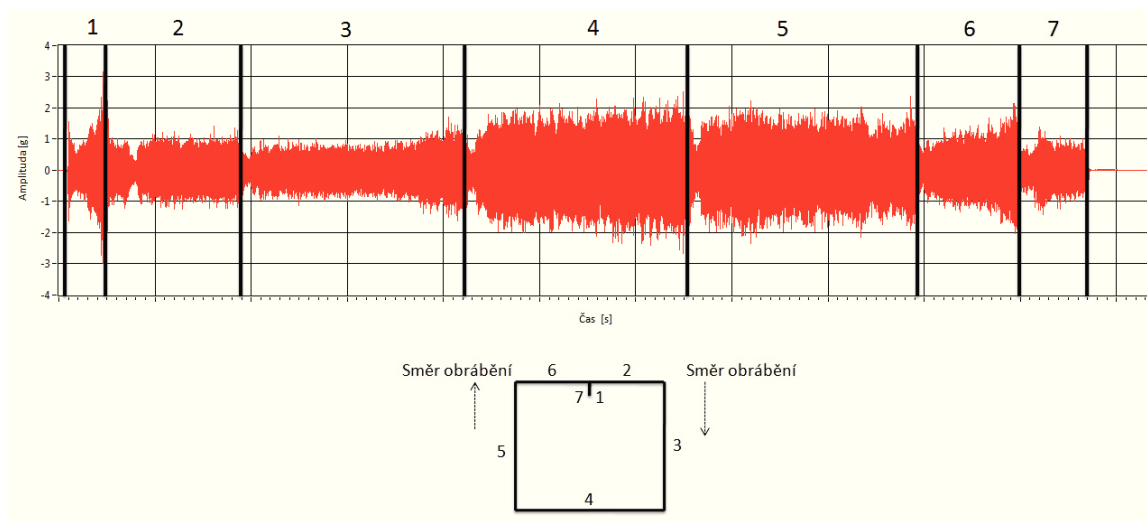
Obr. 4.3 Průběh signálu akustické emise, sada vzorků A, obráběný materiál AISI 309,  $v = 75 [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $p = 350 [\text{MPa}]$ ,  $m_a = 400 [\text{g} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $d_f = 0,8 [\text{mm}]$ ,  $b = 15 [\text{mm}]$

Obr. 4.3 měl následující nastavení vstupních parametrů: obráběný materiál byl AISI 309, rychlost posuvu řezné hlavy byla změněna na  $v = 75 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ , generovaný tlak byl  $p = 350 \text{ [MPa]}$ , hmotnostní tok abraziva  $m_a = 400 \text{ [g} \cdot \text{min}^{-1}]$ , materiál byl obráběn novou (neopotřebovanou) zaostřovací trubicí o průměru  $d_f = 0,8 \text{ [mm]}$  a tloušťka obráběného materiálu byla opět  $b = 15 \text{ [mm]}$ . Použité abrazivo bylo typu Barton Garnet o MESH 80.



Obr. 4.4 Průběh signálu akustické emise, sada vzorků A, obráběný materiál AISI 309,  $v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $p = 350 \text{ [MPa]}$ ,  $m_a = 400 \text{ [g} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $d_f = 0,8 \text{ [mm]}$ ,  $b = 15 \text{ [mm]}$

Na Obr. 4.4 bylo následující nastavení vstupních parametrů: obráběný materiál byl AISI 309, rychlost posuvu řezné hlavy byla změněna na  $v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ , generovaný tlak  $p = 350 \text{ [MPa]}$ , hmotnostní tok abraziva  $m_a = 400 \text{ [g} \cdot \text{min}^{-1}]$ , materiál byl obráběn novou (neopotřebovanou) zaostřovací trubicí o průměru  $d_f = 0,8 \text{ [mm]}$  a tloušťka obráběného materiálu  $b = 15 \text{ [mm]}$ . Použité abrazivo bylo typu Barton Garnet o MESH 80.



Obr. 4.5 Průběh signálu akustické emise, sada vzorků A, obráběný materiál AISI 309,  $v = 150 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $p = 350 \text{ [MPa]}$ ,  $m_a = 400 \text{ [g} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $d_f = 0,8 \text{ [mm]}$ ,  $b = 15 \text{ [mm]}$

Na posledním záznamu (Obr. 4.5) bylo následující nastavení vstupních parametrů: obráběný materiál byl AISI 309, rychlost posuvu řezné hlavy byla změněna na  $v = 150 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ , generovaný tlak byl  $p = 350 \text{ [MPa]}$ , hmotnostní tok abraziva  $m_a = 400 \text{ [g} \cdot \text{min}^{-1}]$ , materiál byl obráběn novou (neopotřebovanou) zaostřovací trubicí o průměru  $d_f = 0,8 \text{ [mm]}$  a tloušťka obráběného materiálu  $b = 15 \text{ [mm]}$ . Použité abrazivo bylo typu Barton Garnet o MESH 80.

Každý z uvedených záznamů se skládá z velkého množství signálů (hodnoty dosahují statisíců údajů). Pro jejich zpracování byl použit systém LabView® 2011.

Všeobecně lze konstatovat, že v úseku 1 na všech výše uvedených obrázcích (Obr. 4.2, Obr. 4.3, Obr. 4.4 a Obr. 4.5) dochází k výraznému zvýšení amplitud až na hodnotu  $4 \text{ [g]}$  z důvodu prvotního průniku hydroabrazivního proudu. Jedná se o jev v délce trvání cca  $2 \div 3$  sekundy, po průniku materiálem se amplituda řezu zmenšuje. Úsek 2 provází klidové působení bez větších výkyvů amplitud a při  $v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  dosahuje maximálně hodnot  $\pm 1,5 \text{ [g]}$ . V následujících vyšších rychlostech posuvu řezné hlavy dosahuje amplituda maximálních hodnot  $\pm 1,0 \text{ [g]}$ .

Úseky 3, 4, 5 a 6 vykazují u Obr. 4.2 a Obr. 4.3 rozměrově symetrické amplitudy do maximálních hodnot  $\pm 2 \text{ [g]}$ . Při zvyšování rychlosti posuvu řezné hlavy na  $v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  a  $v = 150 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  dochází v těchto úsecích k nestabilnímu řezu. Amplitudy zde dosahují maximálních hodnot  $\pm 3 \text{ [g]}$ , přičemž nejvyšších hodnot dosahují na přelomu úseku 4 a 5.

V posledním úseku dochází k logickému zvyšování hodnot amplitud u všech rychlostí  $v$  na maximální hodnoty  $\pm 2,5$  [g] z důvodu dokončování obrábění a tím ke zmenšování hmoty pojící budoucí obráběný polotovar a zbylý materiál. U  $v = 150$  [mm·min<sup>-1</sup>] jsou maximální hodnoty amplitud o něco nižší a to  $\pm 1,5$  [g].

Při nižších rychlostech pohybu řezné hlavy jmenovitě  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>] a  $v = 75$  [mm·min<sup>-1</sup>] lze považovat za proces stabilní bez větších výchylek amplitud. Při vyšších rychlostech, jako jsou  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>] a  $v = 150$  [mm·min<sup>-1</sup>] nabývají hodnoty jednak vyšších amplitud a celkově je proces méně stabilní. Při rychlosti pohybu řezné hlavy u všech rychlostí se jeví jako nejstabilnější úsek č. 3.

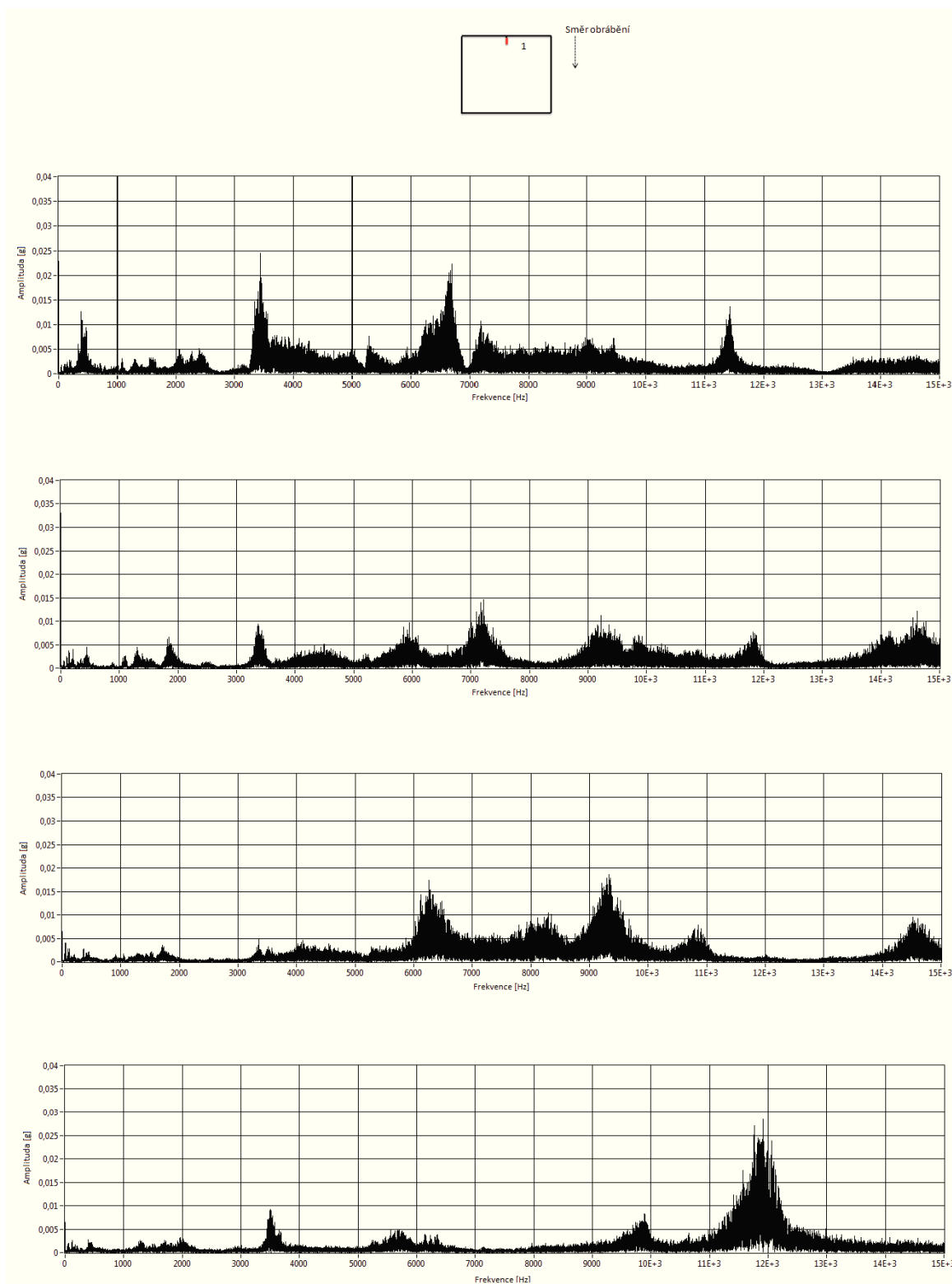
#### 4.1.1 FFT Analýza vzorků A

Fast Fourier Transformation (zk. FFT) je signál, který sledujeme v průběhu přetváření z výše uvedených dat (časově - amplitudových schémat) na frekvenčně amplitudový záznam. Cílem této analýzy je vyhledávání periodických poklesů či nárůstů amplitud tak, aby jsme mohli dále tyto jevy s určitou pravděpodobností předpovídat<sup>1</sup>

Pro experiment bude sledované frekvenční pásmo  $2 \div 15$  [kHz]. Data do 2 [kHz] nebudou zahrnuta do tohoto experimentu z důvodu, že se v minulosti v této oblasti neprojevovala žádná souvislost mezi technologickými nastaveními řezu a akustickými projevy. Následující obrázky jsou výsledkem FFT spektrální analýzy dat vždy jednoho úseku. Pro experiment jsou zvoleny stejné technologické parametry popsané v předchozích kapitolách. Proměnné konstanty budou opět u sady vzorků A rychlosti posuvu řezné hlavy a to jmenovitě  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>],  $v = 75$  [mm·min<sup>-1</sup>],  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>] a  $v = 150$  [mm·min<sup>-1</sup>].<sup>1</sup>

Při FFT analýze akustické emise bloku A vyobrazené na Obr. 4.6 se čtyřmi rychlostmi posuvu řezné hlavy a rozsahem frekvenčního pásma  $2 \div 15$  [kHz] zjišťujeme, že při  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>] dochází k nárůstu amplitudy z  $\pm 0,01$  [g] na  $\pm 0,025$  [g] při frekvencích  $3 \div 4$  [kHz]. Při stejné frekvenci u zbylých rychlostí posuvu řezné hlavy dochází k nárůstu amplitudy z  $\pm 0,01$  [g] na  $\pm 0,009$  [g]. Ve frekvenčním rozsahu  $4 \div 5,5$  [kHz] dochází při  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>] k poklesu amplitud z  $\pm 0,0055$  [g] na  $\pm 0,005$  [g]. Při zbývajících rychlostech sledujeme, že při stejné frekvenci se výrazné amplitudy nevytváří a nabývají hodnot maxima  $\pm 0,005$  [g]. K dalšímu viditelnému nárůstu amplitud dochází na frekvencích  $5,5 \div 6,5$  [kHz], kdy jako nejvýraznější opět shledáváme  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>]. Amplitudy zde dosahují hodnot maxima  $\pm 0,023$  [g]. Při  $v = 75$  [mm·min<sup>-1</sup>] o stejné frekvenci je maximum  $\pm 0,01$  [g], u  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>] o





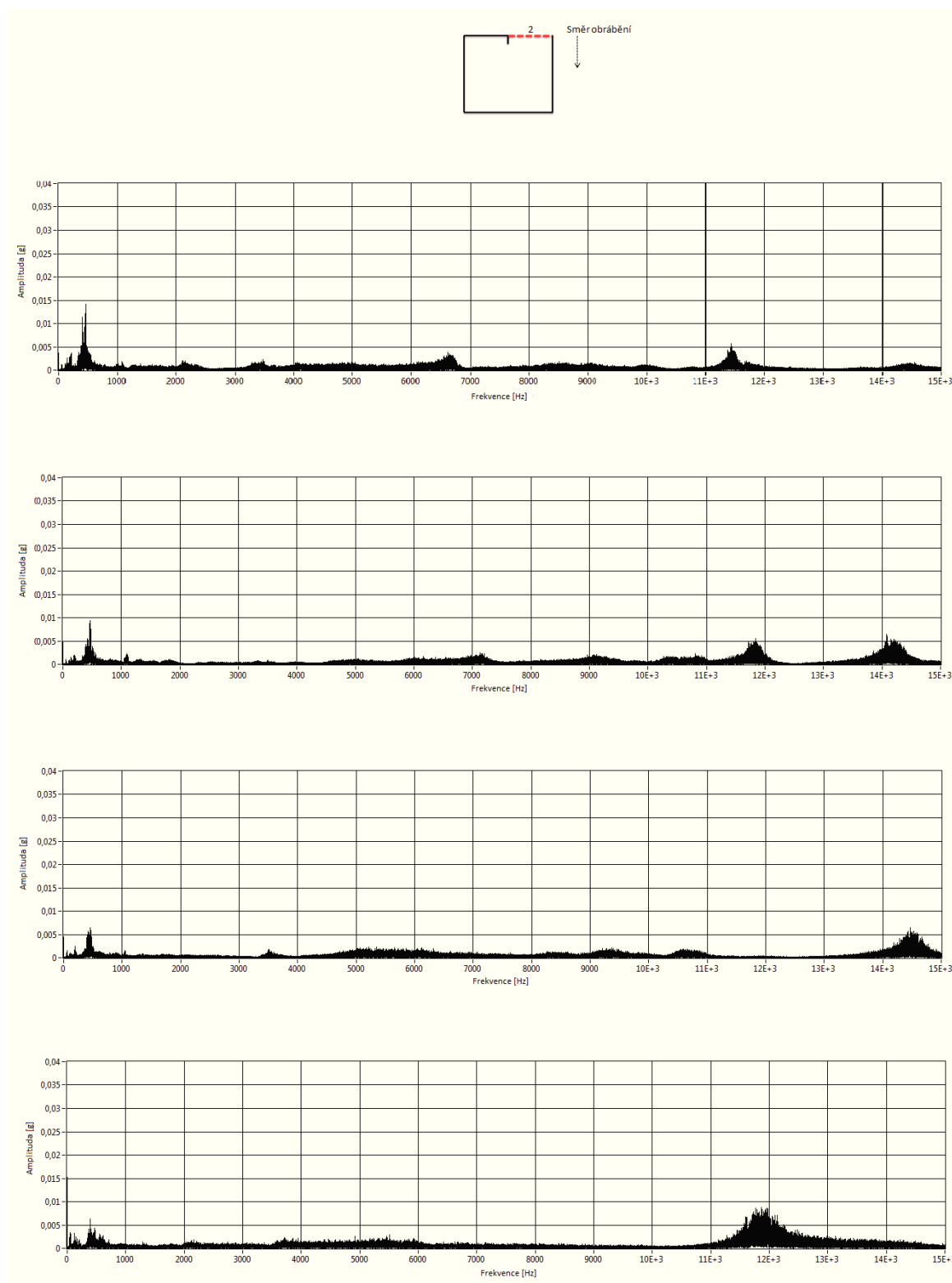
Obr. 4.6 FTT analýza sady vzorků A, první řez, obráběný materiál AISI 309,  $p = 350$  [MPa],  $m_a = 400$  [ $g \cdot min^{-1}$ ],  $d_f = 0,8$  [mm],  $b = 15$  [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora  $v = 50$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ],  $v = 75$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ],  $v = 100$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ] a  $v = 150$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ]

stejně frekvenci je maximum  $\pm 0,018$  [g]. Při nejvyšší rychlosti posuvu řezné hlavy je ve stejném frekvenčním rozsahu amplituda téměř nezatelná a dosahuje nejvýše  $\pm 0,005$  [g]. U  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>] ve zbývajícím rozsahu spektra frekvencí  $7 \div 15$  [kHz] dochází k jedinému výraznému periodickému nárůstu (a posléze poklesu) amplitud a to na hodnotu maxima  $\pm 0,014$  [g] v oblasti frekvencí  $11 \div 12$  [kHz]. U  $v = 75$  [mm·min<sup>-1</sup>] k viditelnému nárůstu amplitud nabývají frekvenční rozsah  $6,5 \div 7,5$  [kHz] je hodnota maxima  $\pm 0,015$  [g]. Zbylé amplitudy o stejné rychlostmi posuvu řezné hlavy se nacházejí v oblasti  $8,5 \div 9,5$  [kHz],  $11,5 \div 12$  [kHz],  $14 \div 15$  [kHz] a dosahují hodnot maxima  $\pm 0,011$  [g]. U  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>] k viditelnému nárůstu amplitud ve zbylém frekvenčním spektru  $7 \div 15$  [kHz] dochází ve třech případech, jednak v oblasti  $9 \div 10$  [kHz], kdy je hodnota maxima  $\pm 0,018$  [g], dále v oblasti  $10,5 \div 11,5$  [kHz], kdy je hodnota maxima  $\pm 0,008$  [g] a naposledy u koncové měřené oblasti  $14 \div 15$  [kHz], kdy se hodnota maxima pohybuje do  $\pm 0,01$  [g]. U nejvyšší rychlostmi posuvu řezné hlavy se na frekvenčním rozsahu  $7 \div 15$  [kHz] objevují periodicky narůstající amplitudy jednak v  $9,5 \div 10,5$  [kHz], kdy je hodnota maxima  $\pm 0,008$  [g], ale pak zejména v oblasti  $11 \div 13$  [kHz] kdy se hodnota maxima pohybuje do  $\pm 0,028$  [g].

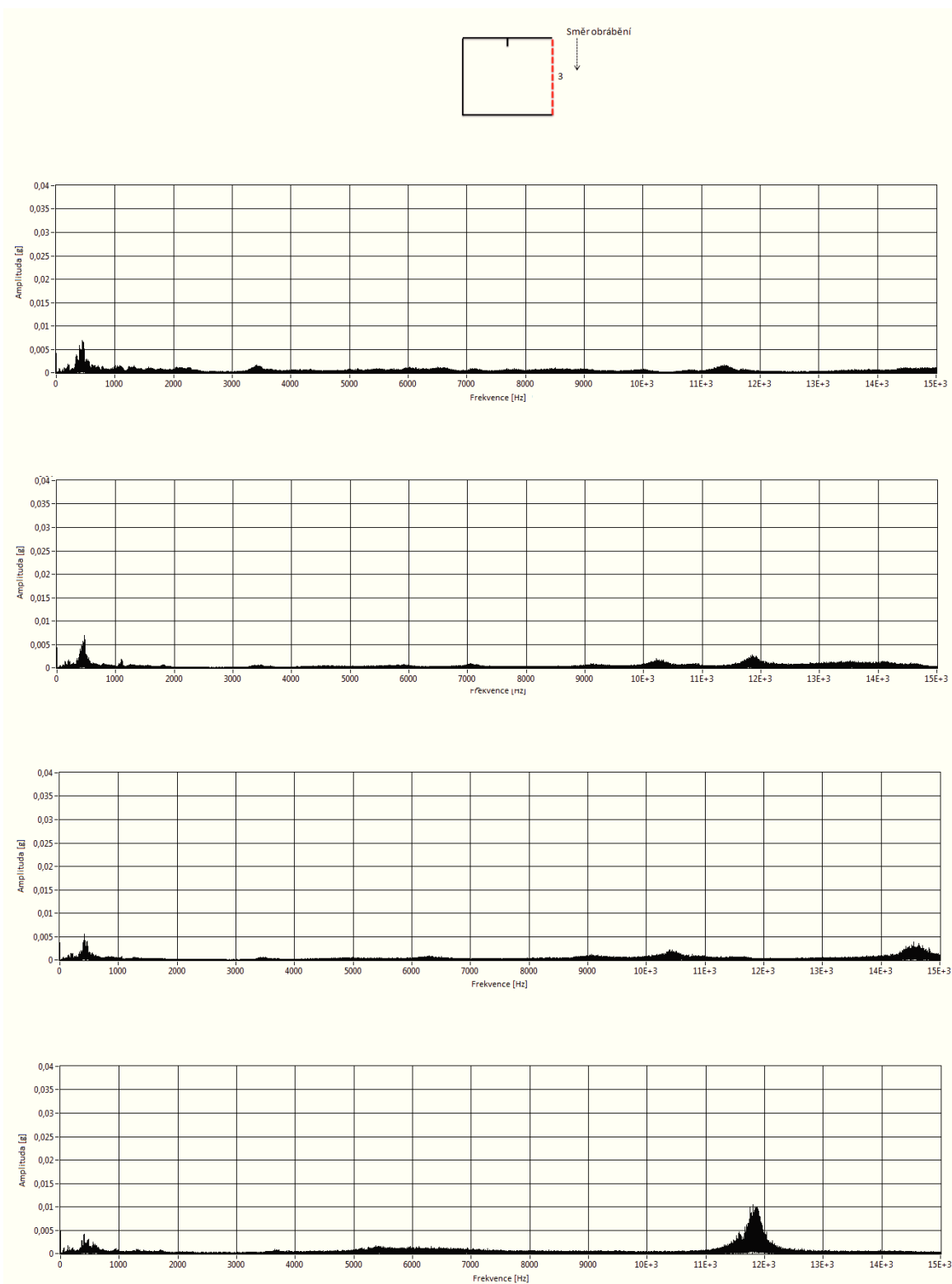
Spektrální analýza FFT Bloku A u následujícího obrázku (Obr. 4.7) je následující. U všech zkoumaných rychlostí posuvu řezné hlavy se ve zkoumané oblasti  $2 \div 15$  [kHz] téměř periodický nárůst amplitud nevyskytuje. Výjimkou je oblast  $11 \div 12$  [kHz] u  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>] a  $v = 75$  [mm·min<sup>-1</sup>], kdy je hodnota maxima  $\pm 0,005$  [g]. U  $v = 75$  [mm·min<sup>-1</sup>] a  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>] pozorujeme dále velmi mírný periodický nárůst amplitudy o frekvenčním rozsahu  $13,5 \div 15$  [kHz], který nabývá hodnot  $\pm 0,007$  [g]. Při nejvyšší rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 150$  [mm·min<sup>-1</sup>] dochází k nárůstu amplitudy pouze v jediném bodě a to v oblasti frekvenčního spektra  $11 \div 13$  [kHz], který nabývá hodnot maxima  $\pm 0,008$  [g].

U Obr. 4.8, kde je prováděna spektrální analýza FFT Bloku A je situace velmi obdobná jako na Obr. 4.7, kdy je však míra ještě snížena na téměř nepozorovatelnou úroveň. Jedinou výjimkou je nejvyšší rychlost posuvu řezné hlavy  $v = 150$  [mm·min<sup>-1</sup>], kde dochází k nárůstu amplitudy v oblasti frekvenčního spektra  $11 \div 13$  [kHz], který nabývá hodnot maxima  $\pm 0,01$  [g].

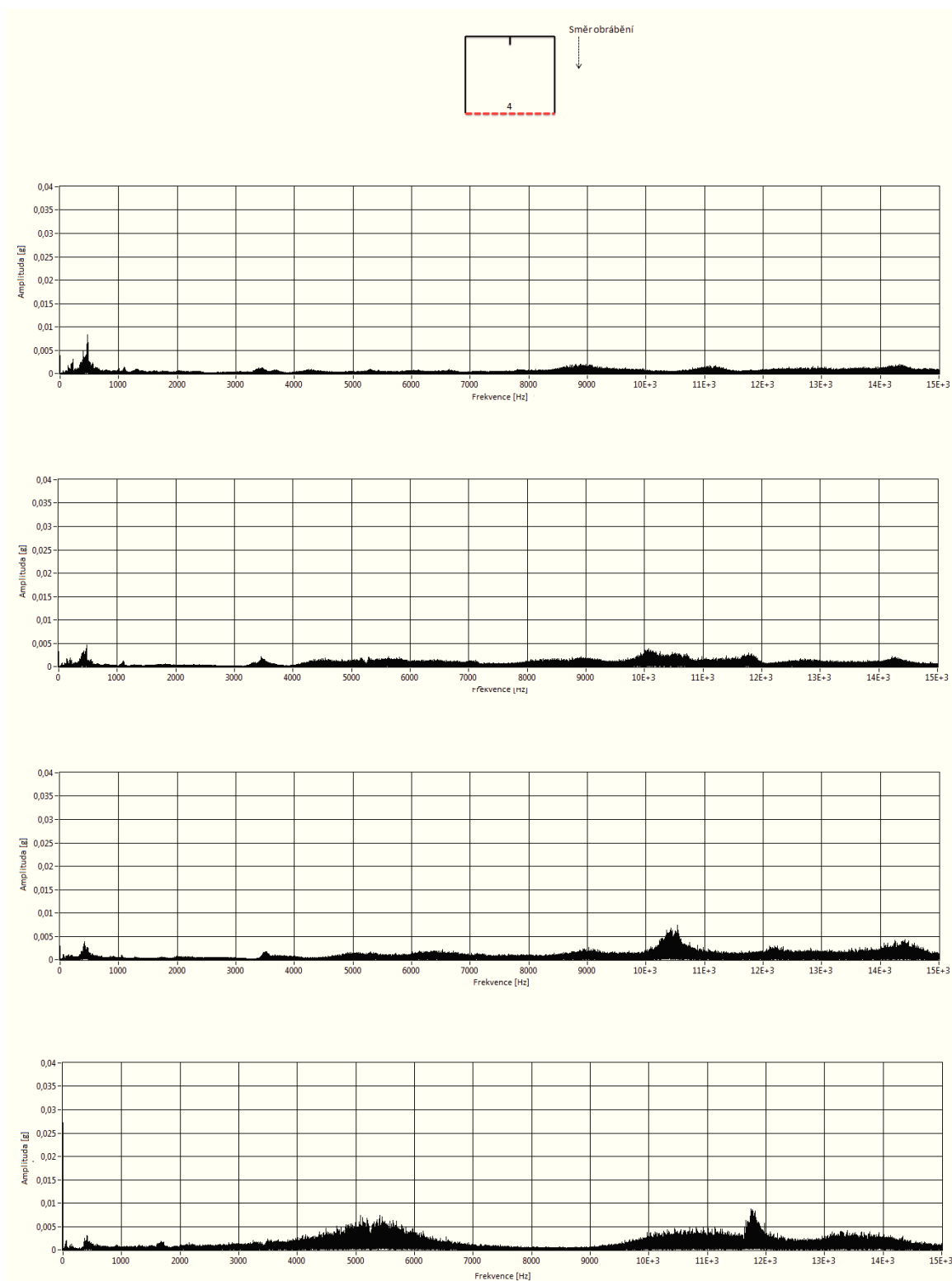
Obr. 4.9 znázorňuje provedení spektrální analýzy FFT Bloku A. Po celém zkoumaném frekvenčním rozsahu  $7 \div 15$  [kHz] se neobjevují periodicky narůstající amplitudy, výjimkou tvoří nejvyšší rychlost posuvu řezné hlavy  $v = 150$  [mm·min<sup>-1</sup>], kde dochází k nárůstu amplitudy v oblasti frekvenčního spektra  $4 \div 6,5$  [kHz], který nabývá hodnot maxima  $\pm 0,007$  [g] a v oblasti frekvenčního spektra  $11,5 \div 12,5$  [kHz], který



Obr. 4.7 FTT analýza sady vzorků A, druhý řez, obráběný materiál AISI 309,  $p = 350$  [MPa],  $m_a = 400$  [ $g \cdot min^{-1}$ ],  $d_f = 0,8$  [mm],  $b = 15$  [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora  $v = 50$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ],  $v = 75$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ],  $v = 100$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ] a  $v = 150$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ]



Obr. 4.8 FTT analýza sady vzorků A, třetí řez, obráběný materiál AISI 309,  $p = 350$  [MPa],  $m_a = 400$  [g·min<sup>-1</sup>],  $d_f = 0,8$  [mm],  $b = 15$  [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>],  $v = 75$  [mm·min<sup>-1</sup>],  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>] a  $v = 150$  [mm·min<sup>-1</sup>]



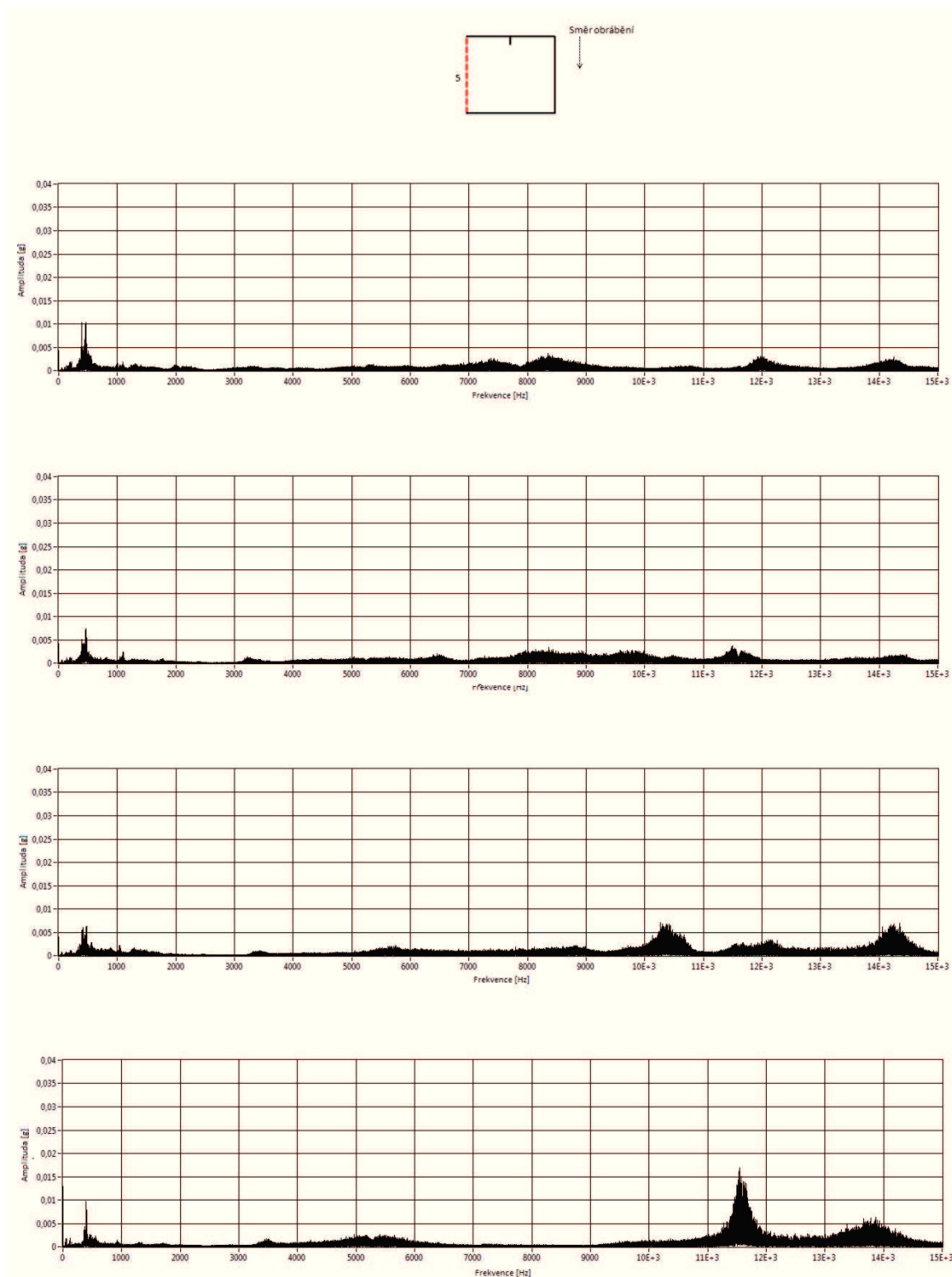
Obr. 4.9 FTT analýza sady vzorků A, čtvrtý řez, obráběný materiál AISI 309,  $p = 350$  [MPa],  $m_a = 400$  [ $g \cdot min^{-1}$ ],  $d_f = 0,8$  [mm],  $b = 15$  [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora  $v = 50$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ],  $v = 75$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ],  $v = 100$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ] a  $v = 150$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ]

nabývá hodnot maxima  $\pm 0,007$  [g]. Ve všech zbývajících frekvenčních spektrech při všech zkoumaných rychlostech hodnota nárůstu amplitudy do maxima  $\pm 0,005$  [g].

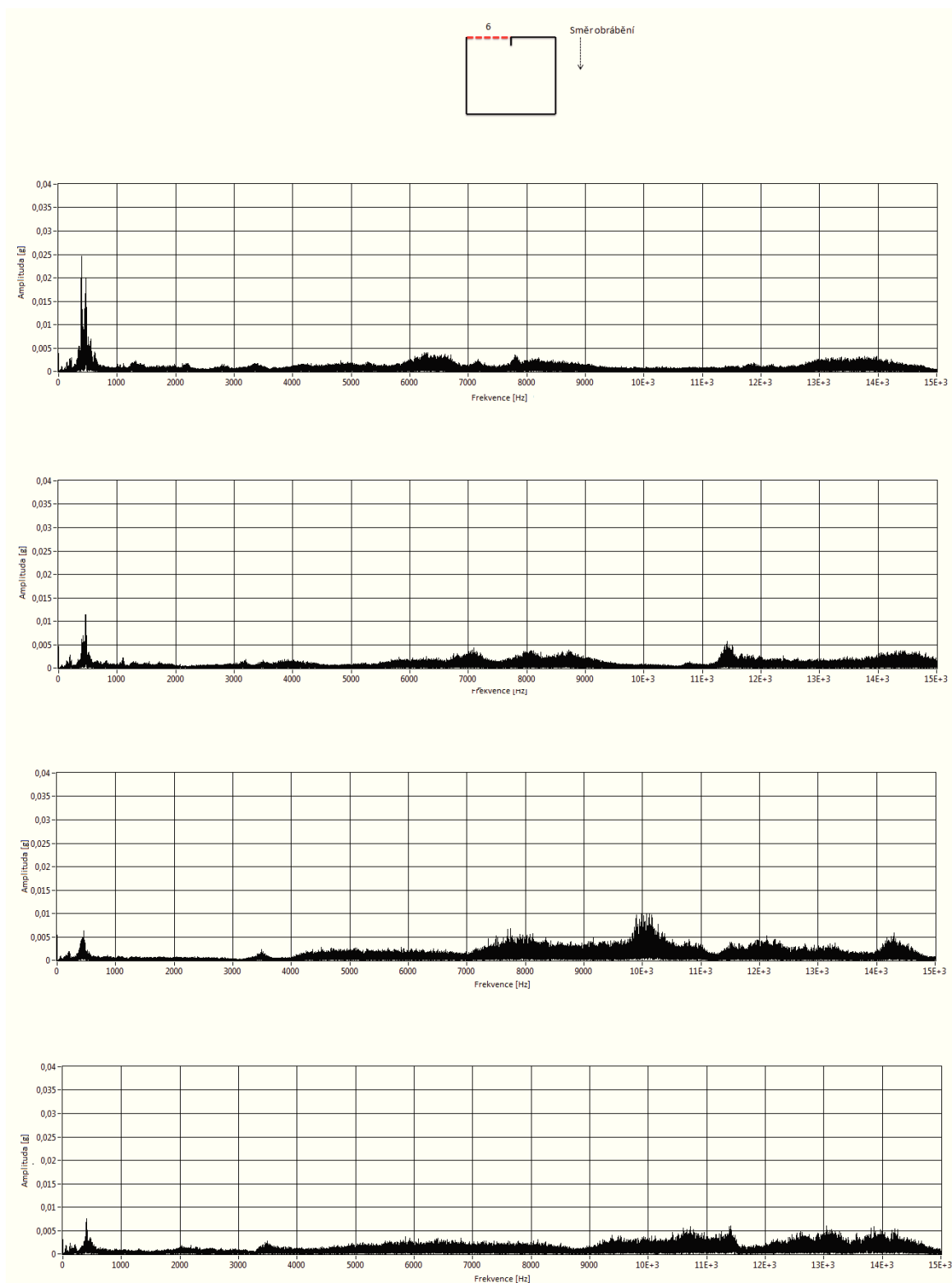
Obr. 4.10 znázorňuje provedení spektrální analýzy FFT Bloku A. Po celém zkoumaném frekvenčním rozsahu  $7 \div 15$  [kHz] se neobjevují periodicky narůstající amplitudy, výjimkou tvoří rychlost posuvu řezné hlavy  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>], kde dochází k nárůstu amplitudy v oblasti frekvenčního spektra  $10 \div 11$  [kHz], který nabývá hodnot maxima  $\pm 0,007$  [g] a v oblasti frekvenčního spektra  $13,5 \div 14,5$  [kHz], který nabývá hodnot maxima  $\pm 0,007$  [g]. Při nejvyšší rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 150$  [mm·min<sup>-1</sup>], dosahuje nárůstu amplitudy v oblasti frekvenčního spektra  $11 \div 12$  [kHz] hodnot maxima  $\pm 0,017$  [g] a v oblasti frekvenčního pásma  $13,5 \div 14,5$  [kHz], který nabývá hodnot maxima  $\pm 0,007$  [g]. Ve všech zbývajících frekvenčních spektrech při všech zkoumaných rychlost posuvu řezné hlavy hodnota nárůstu amplitudy do maxima  $\pm 0,005$  [g].

Obr. 4.11 zobrazuje realizaci spektrální analýzy FFT Bloku A. Po celém zkoumaném frekvenčním rozsahu  $7 \div 15$  [kHz] se neobjevují periodicky narůstající amplitudy, výjimkou tvoří pouze rychlost posuvu řezné hlavy  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>], kde dochází k nárůstu amplitudy v oblasti frekvenčního spektra  $9,5 \div 10,5$  [kHz], který nabývá hodnot maxima  $\pm 0,01$  [g]. Ve všech zbývajících frekvenčních spektrech při všech zkoumaných rychlost posuvu řezné hlavy hodnota nárůstu amplitudy do maxima  $\pm 0,005$  [g].

Spektrální analýza FFT Bloku A u Obr. 4.12 je následující. U rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>] se ve zkoumané oblasti  $2 \div 15$  [kHz] periodický nárůst amplitud vyskytuje jednak v oblasti  $5,5 \div 7$  [kHz], kdy je hodnota maxima  $\pm 0,01$  [g], dále v oblasti  $8 \div 9$  [kHz] kdy je hodnota maxima  $\pm 0,007$  [g] a nakonec v oblasti  $13 \div 14$  [kHz], kdy je hodnota maxima  $\pm 0,013$  [g]. U  $v = 75$  [mm·min<sup>-1</sup>] pozorujeme periodický nárůst amplitudy o frekvenčním rozsahu  $6,5 \div 7$  [kHz], který nabývá hodnot  $\pm 0,008$  [g], dále ve frekvenčním spektru  $7 \div 8$  [kHz], kdy je hodnota maxima  $\pm 0,008$  [g] a nakonec v oblasti  $8 \div 9$  [kHz] kdy je hodnota maxima  $\pm 0,015$  [g]. Se zvyšující se rychlostí posuvu řezné hlavy na  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>] dochází k vyššímu četnosti amplitud. V oblasti frekvenčního rozsahu  $3 \div 4$  [kHz], který dosahuje hodnot maxima  $\pm 0,008$  [g], dále v oblasti frekvenčního spektra  $5,5 \div 6$  [kHz], který nabývá hodnot maxima  $\pm 0,007$  [g], dále v oblasti frekvenčního spektra  $6,5 \div 7,5$  [kHz], který nabývá hodnot maxima  $\pm 0,0013$  [g], dále v oblasti frekvenčního rozsahu  $9 \div 10$  [kHz], který dosahuje hodnot maxima  $\pm 0,008$  [g], a nakonec v oblasti frekvenčního spektra  $14 \div 15$  [kHz], který nabývá hodnot maxima  $\pm 0,011$  [g]. Při nejvyšší rychlosti dochází k výskytu amplitudy v oblasti frekvenčního rozsahu  $9,5 \div 11,5$  [kHz], která dosahuje hodnot maxima  $\pm 0,013$  [g]. Ve všech zbývajících frekvenčních spektrech při všech zkoumaných rychlost posuvu řezné hlavy hodnota nárůstu amplitudy do maxima  $\pm 0,005$  [g].

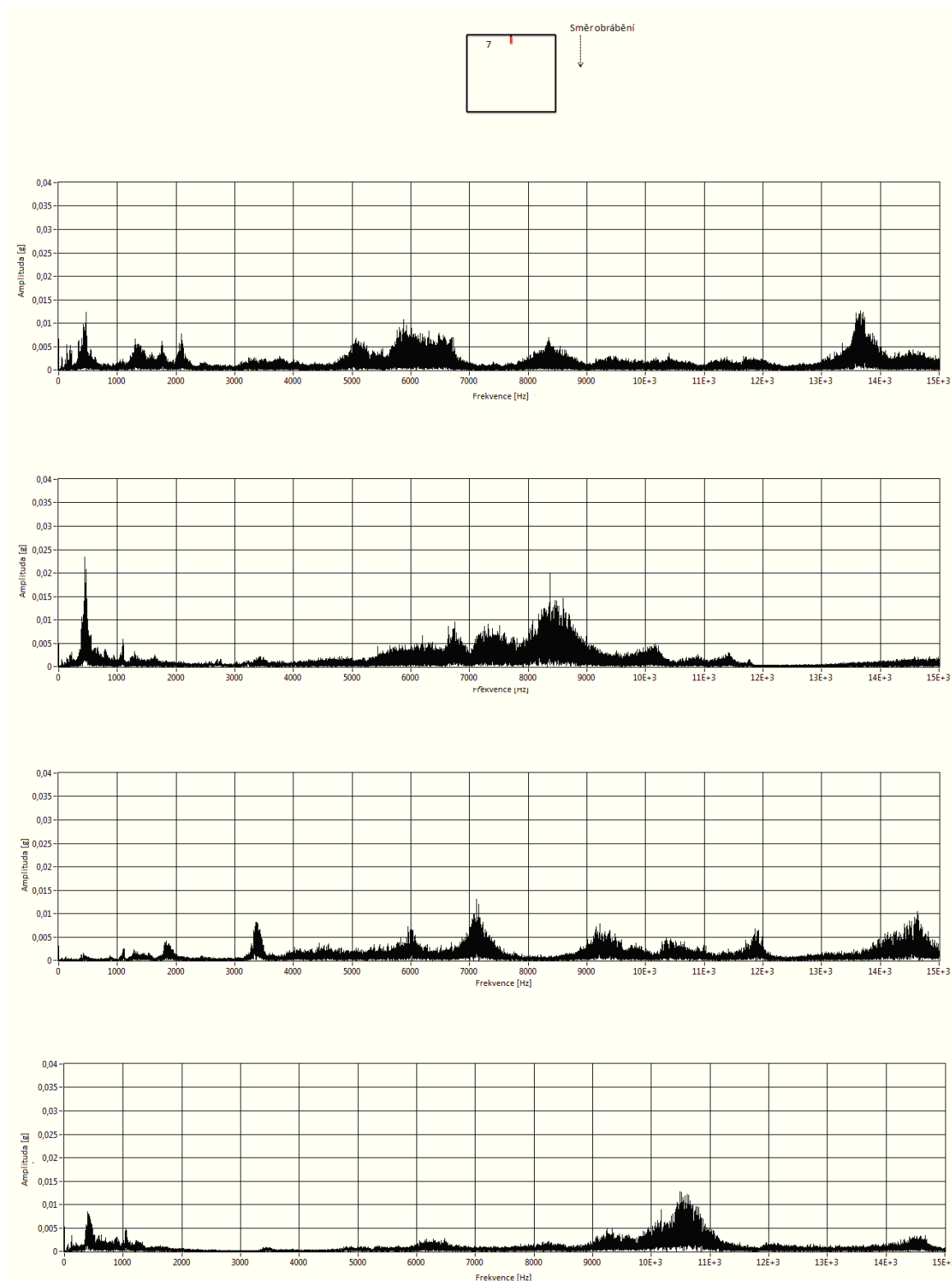


Obr. 4.10 FTT analýza sady vzorků A, pátý řez, obráběný materiál AISI 309,  $p = 350$  [MPa],  $m_a = 400$  [g·min<sup>-1</sup>],  $d_f = 0,8$  [mm],  $b = 15$  [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>],  $v = 75$  [mm·min<sup>-1</sup>],  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>] a  $v = 150$  [mm·min<sup>-1</sup>]



Obr. 4.11 FTT analýza sady vzorků A, šestý řez, obráběný materiál AISI 309,  $p = 350$  [MPa],  $m_a = 400$  [ $g \cdot min^{-1}$ ],  $d_f = 0,8$  [mm],  $b = 15$  [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora  $v = 50$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ],  $v = 75$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ],  $v = 100$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ] a  $v = 150$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ]





Obr. 4.12 FTT analýza sady vzorků A, sedmý řez, obráběný materiál AISI 309,  $p = 350$  [MPa],  $m_a = 400$  [ $\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$ ],  $d_f = 0,8$  [mm],  $b = 15$  [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora  $v = 50$  [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ],  $v = 75$  [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ],  $v = 100$  [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ] a  $v = 150$  [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ]

Tab. 4.1 Analýza FFT maximální hodnoty mediánu a peak to peak frekvencí signálů akustické emise u dvou řezných rychlostí na materiálu AISI 309

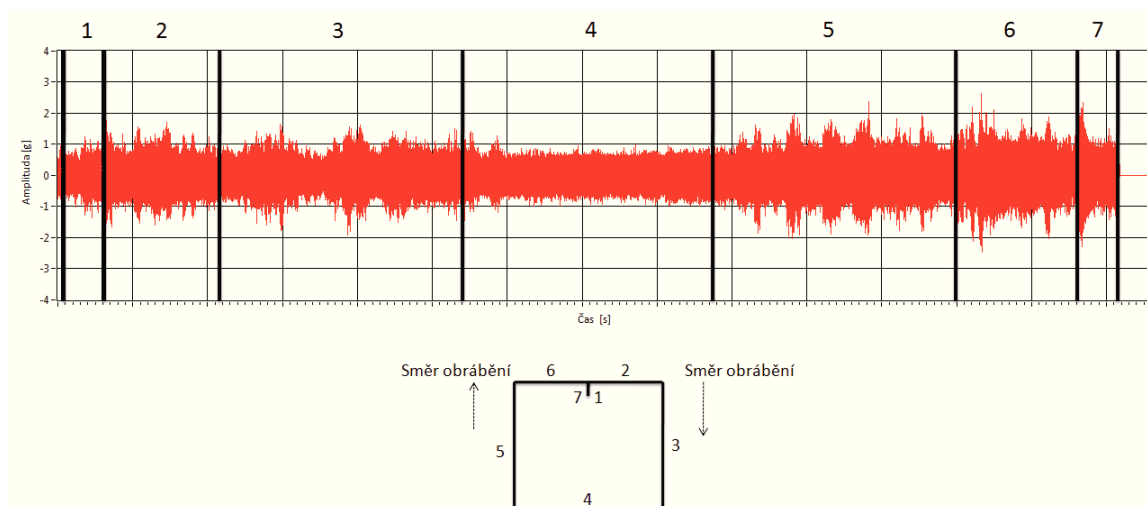
Sada	Podmínky experimentu	Sledovaná hodnota	1. úsek	2. úsek	3. úsek	4. úsek	5. úsek	6. úsek	7. úsek
A	v = 50 [mm·min <sup>-1</sup> ] ma= 400 [g·min <sup>-1</sup> ] p = 350 [MPa] df = 0,8 [mm] b = 15 [mm]	Medián [mm]	-0,01131	0,015821	0,020262	0,018922	0,017786	0,018533	0,009899
		Peak to peak [g]	8,58308	4,16475	5,17279	3,95731	5,59307	6,1895	7,34963
A	v = 100 [mm·min <sup>-1</sup> ] ma= 400 [g·min <sup>-1</sup> ] p = 350 [MPa] df = 0,8 [mm] b = 15 [mm]	Medián [mm]	-0,068107	0,019043	0,023606	0,024218	0,018003	0,015017	0,02002
		Peak to peak [g]	7,13576	2,57681	4,49611	4,88365	6,96509	4,72418	6,09018

Cílem této práce je souvislost faktorů hydroabrazivního obrábění a hladinou akustické emise. Údaje které jsme zpracovávali byly stanoveny jako způsobilé, dostatečně výstižně charakterizovat změny výchylek akustického průběhu při experimentálním obrábění. V tabulce 4.1 je zobrazen Medián, Peak to Peak, ale k dispozici bylo mnoho dalších údajů, jako: Peak, negative Peak, cyklová RMS hodnota, cyklový průměr, hodnota aritmetické průměru cyklů, frekvence, celková RMS a nakonec celkový průměr.<sup>1</sup>

Pokročování k dané problematice bude uvedeno v 4.5.

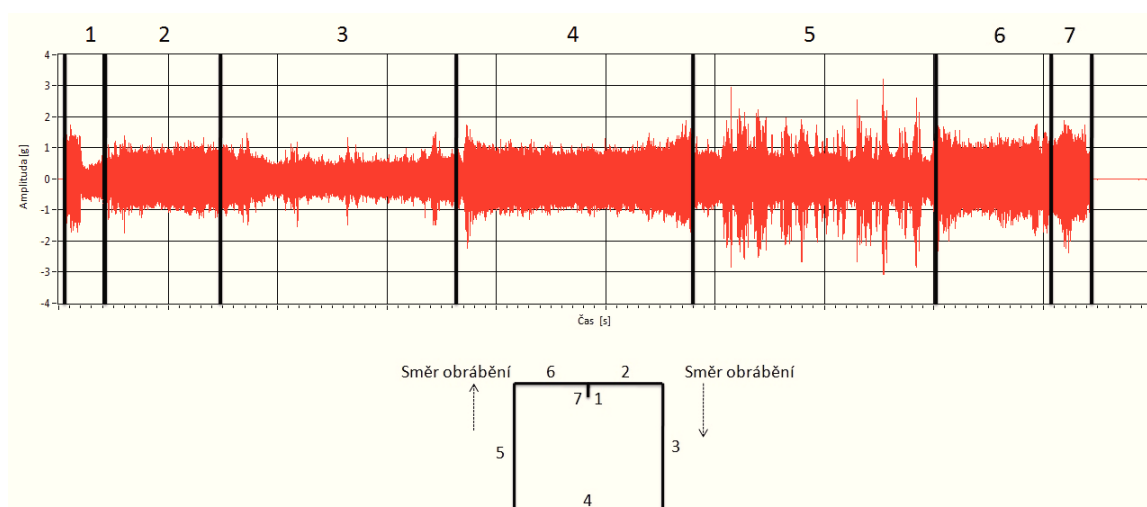
## 4.2 SADA VZORKŮ B

Sada vzorků B se bude zpracovávat obdobným způsobem jako Sada A, rozdíl je pouze v jiném nastavením hmotnostního toku abraziva a to v tomto případě  $m_a = 250 \text{ [g} \cdot \text{min}^{-1}\text{]}$ .



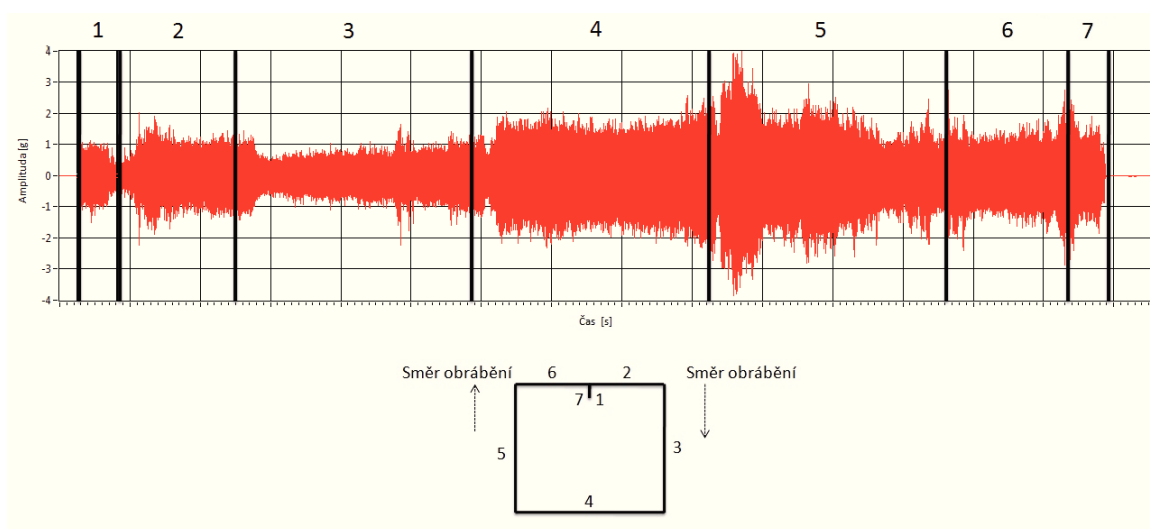
Obr. 4.13 Průběh signálu akustické emise, sada vzorků B, obráběný materiál AISI 309,  $v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}\text{]}$ ,  $p = 350 \text{ [MPa]}$ ,  $m_a = 250 \text{ [g} \cdot \text{min}^{-1}\text{]}$ ,  $d_f = 0,8 \text{ [mm]}$ ,  $b = 15 \text{ [mm]}$

Průběh zobrazený na Obr. 4.13 měl následující nastavení vstupních parametrů: obráběný materiál byl AISI 309, rychlost posuvu řezné hlavy  $v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}\text{]}$ , generovaný tlak byl  $p = 350 \text{ [MPa]}$ , hmotnostní tok abraziva  $m_a = 400 \text{ [g} \cdot \text{min}^{-1}\text{]}$ , materiál byl obráběn novou (neopotřebovanou) zaostřovací trubicí o průměru  $d_f = 0,8 \text{ [mm]}$  a tloušťka obráběného materiálu  $b = 15 \text{ [mm]}$ . Použité abrazivo bylo typu Barton Garnet o MESH 80.



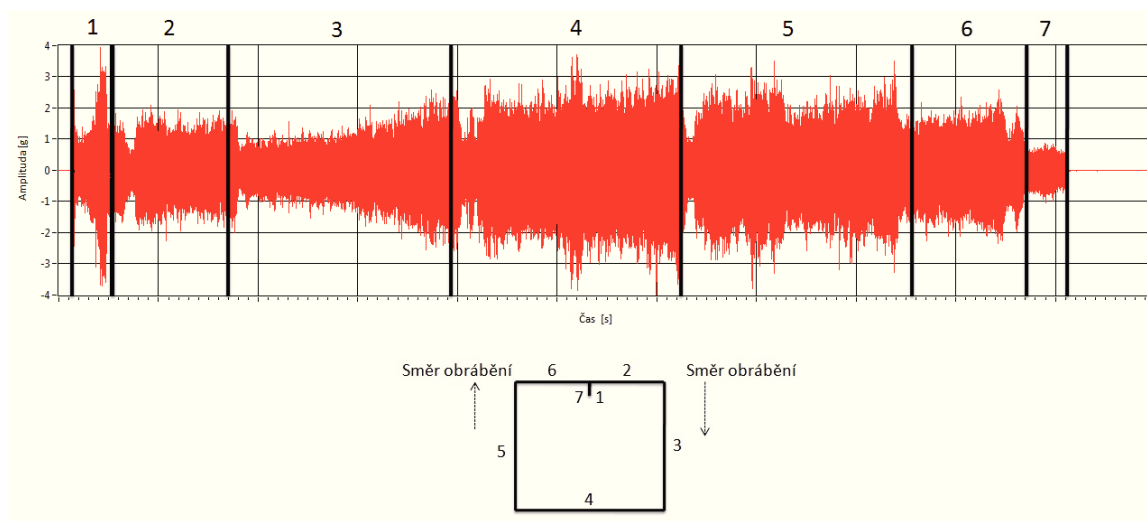
Obr. 4.14 Průběh signálu akustické emise, sada vzorků B, obráběný materiál AISI 309,  $v = 75 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}\text{]}$ ,  $p = 350 \text{ [MPa]}$ ,  $m_a = 250 \text{ [g} \cdot \text{min}^{-1}\text{]}$ ,  $d_f = 0,8 \text{ [mm]}$ ,  $b = 15 \text{ [mm]}$

Obr. 4.14 měl následující nastavení vstupních parametrů: obráběný materiál byl AISI 309, rychlost posuvu řezné hlavy byla změněna na  $v = 75 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ , generovaný tlak byl  $p = 350 \text{ [MPa]}$ , hmotnostní tok abraziva  $m_a = 400 \text{ [g} \cdot \text{min}^{-1}]$ , materiál byl obráběn novou (neopotřebovanou) zaostřovací trubicí o průměru  $d_f = 0,8 \text{ [mm]}$  a tloušťka obráběného materiálu byla opět  $b = 15 \text{ [mm]}$ . Použité abrazivo bylo typu Barton Garnet o MESH 80.



Obr. 4.15 Průběh signálu akustické emise, sada vzorků B, obráběný materiál AISI 309,  $v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $p = 350 \text{ [MPa]}$ ,  $m_a = 250 \text{ [g} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $d_f = 0,8 \text{ [mm]}$ ,  $b = 15 \text{ [mm]}$

Na Obr. 4.15 bylo následující nastavení vstupních parametrů: obráběný materiál byl AISI 309, rychlost posuvu řezné hlavy byla změněna na  $v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ , generovaný tlak  $p = 350 \text{ [MPa]}$ , hmotnostní tok abraziva  $m_a = 400 \text{ [g} \cdot \text{min}^{-1}]$ , materiál byl obráběn novou (neopotřebovanou) zaostřovací trubicí o průměru  $d_f = 0,8 \text{ [mm]}$  a tloušťka obráběného materiálu  $b = 15 \text{ [mm]}$ . Použité abrazivo bylo typu Barton Garnet o MESH 80.



Obr. 4.16 Průběh signálu akustické emise, sada vzorků B, obráběný materiál AISI 309,  $v = 150 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $p = 350 \text{ [MPa]}$ ,  $m_a = 250 \text{ [g} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $d_f = 0,8 \text{ [mm]}$ ,  $b = 15 \text{ [mm]}$

Na posledním záznamu (Obr. 4.16) bylo následující nastavení vstupních parametrů: obráběný materiál byl AISI 309, rychlost posuvu řezné hlavy byla změněna na  $v = 150 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ , generovaný tlak byl  $p = 350 \text{ [MPa]}$ , hmotnostní tok abraziva  $m_a = 250 \text{ [g} \cdot \text{min}^{-1}]$ , materiál byl obráběn novou (neopotřebovanou) zaostřovací trubicí o průměru  $d_f = 0,8 \text{ [mm]}$  a tloušťka obráběného materiálu  $b = 15 \text{ [mm]}$ . Použité abrazivo bylo typu Barton Garnet o MESH 80.

Všeobecně lze konstatovat že v úseku 1 na všech výše uvedených obrázcích (Obr. 4.13, Obr. 4.14, Obr. 4.15 a Obr. 4.16) dochází k výraznému zvýšení amplitud, přičemž u rychlostí posuvu řezné hlavy  $v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $v = 75 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  a  $v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  do hodnot  $\pm 2 \text{ [g]}$  a u nejvyšší rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 150 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  až na hodnotu  $\pm 4 \text{ [g]}$ . Z důvodu prvotního průniku hydroabrazivního proudu. Jedná se o jev v délce trvání cca  $2 \div 3$  sekundy, po průniku materiálem se amplituda řezu zmenšuje.

Úsek 2 provází převážně klidové působení bez větších výkyvů amplitud při  $v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $v = 75 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  a  $v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ , dosahuje maximálně hodnot  $\pm 1,5 \text{ [g]}$ . V následujících vyšších rychlostech posuvu řezné hlavy dosahuje amplituda maximálních hodnot  $\pm 2,0 \text{ [g]}$ .

Úsek 3, vykazuje u Obr. 4.13, Obr. 4.14 a Obr. 4.15 mírně kolísání amplitudy do maximálních hodnot  $\pm 1,5 \text{ [g]}$ . Při zvyšování rychlosti posuvu řezné hlavy na  $v = 150 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  dochází v tomto úseku k narůstání amplitudy, která dosahuje maximálních hodnot  $\pm 2,5 \text{ [g]}$ .

Úsek 4, vykazuje u rychlostí posuvu řezné hlavy  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>],  $v = 75$  [mm·min<sup>-1</sup>] a  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>] rozměrově symetrické amplitudy do maximálních hodnot u  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>]  $\pm 1$  [g], u  $v = 75$  [mm·min<sup>-1</sup>]  $\pm 2$  [g] a u  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>]  $\pm 2,5$  [g]. Při zvyšování rychlosti posuvu řezné hlavy na  $v = 150$  [mm·min<sup>-1</sup>] dochází v tomto úseku k nestabilnímu řezu. Amplituda zde dosahuje maximálních hodnot  $\pm 3,5$  [g].

V úseku 5 dochází k nestabilnímu řezu ve všech výše uvedených obrázcích (Obr. 4.13, Obr. 4.14, Obr. 4.15 a Obr. 4.16) a to do maximálních hodnot u  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>]  $\pm 2$  [g], u  $v = 75$  [mm·min<sup>-1</sup>]  $\pm 4$  [g], u  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>]  $\pm 3$  [g] a u  $v = 150$  [mm·min<sup>-1</sup>]  $\pm 3,5$  [g].

Úsek 6, vykazuje u Obr. 4.13, Obr. 4.14, Obr. 4.15 a Obr. 4.16 mírně kolísání amplitudy do maximálních hodnot  $\pm 2,5$  [g].

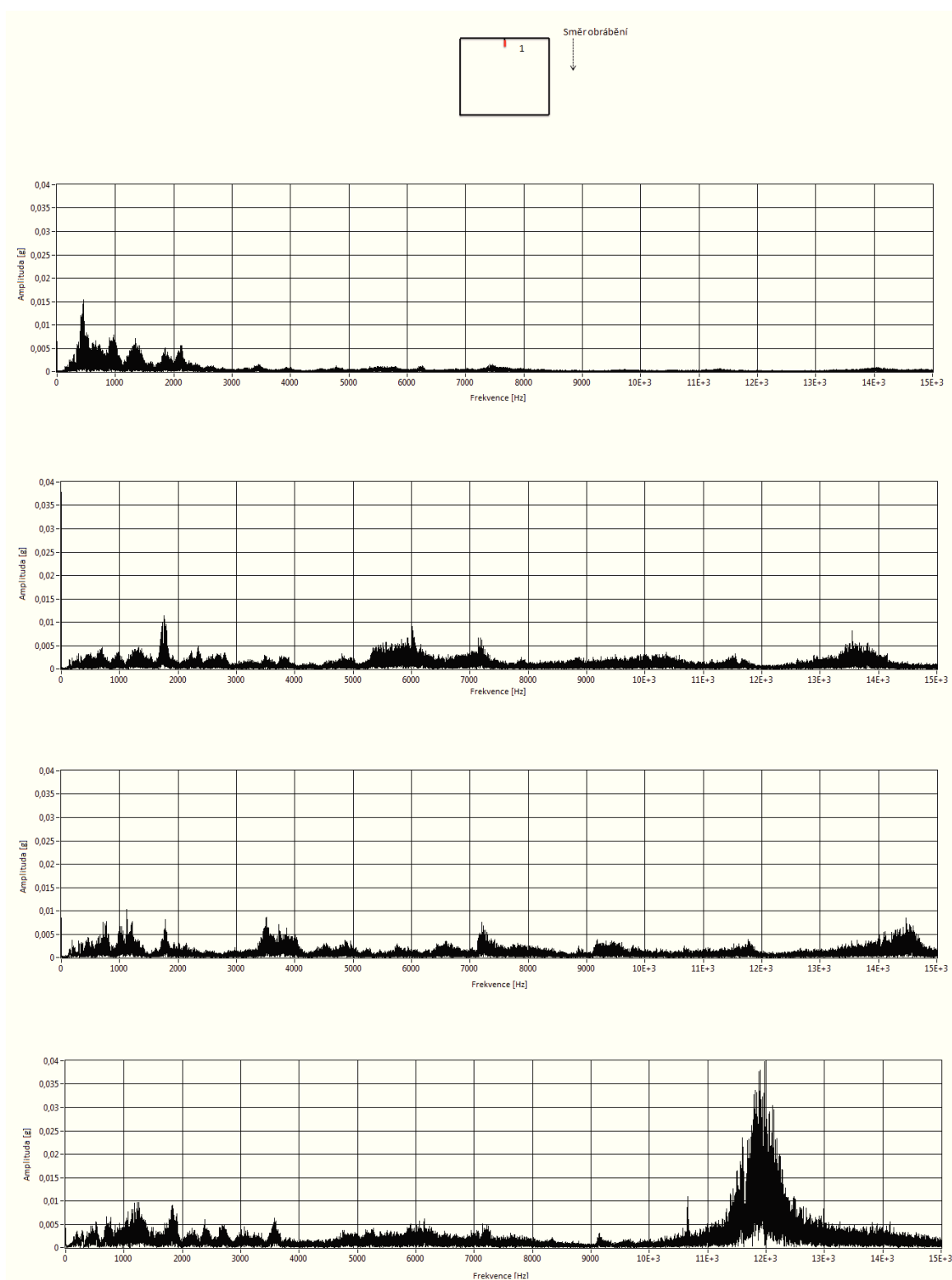
Úsek 7, vykazuje u Obr. 4.13, Obr. 4.14 a Obr. 4.15 obdobně mírně kolísání amplitudy do maximálních hodnot  $\pm 2,5$  [g]. Při zvyšování rychlosti posuvu řezné hlavy na  $v = 150$  [mm·min<sup>-1</sup>] se hodnota amplitudy pohybuje v maximálních hodnotách  $\pm 2$ , [g].

Při rychlosti pohybu řezné hlavy u rychlostí posuvu řezné hlavy  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>],  $v = 75$  [mm·min<sup>-1</sup>] a  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>] se jeví jako nejstabilnější úsek č. 4, se zvyšující se rychlosti posuvu řezné hlavy na  $v = 150$  [mm·min<sup>-1</sup>] se jeví jako nejstabilnější úsek č. 5.

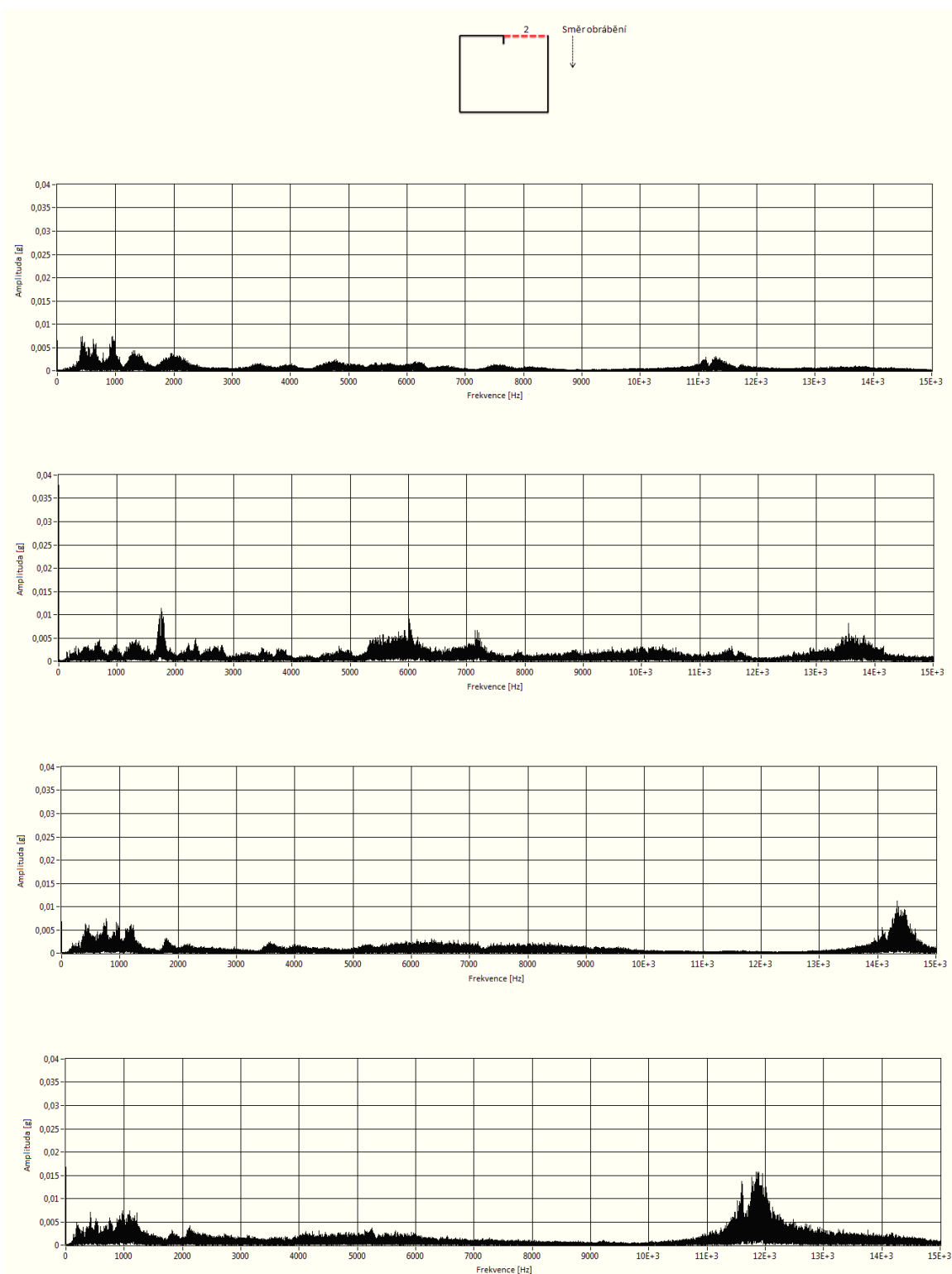
Jako nejnestabilnější úsek se u všech rychlostí pohybu řezné hlavy jeví úsek č. 4

#### 4.2.1 FFT Analýza vzorků B

Sada vzorků B se bude zpracovávat obdobným způsobem FFT analýzy jako Sadu A (viz. 4.1.1), rozdíl je pouze v jiném nastavením hmotnostního toku abraziva a to v tomto případě  $m_a = 250$  [g·min<sup>-1</sup>]



Obr. 4.17 FTT analýza sady vzorků B, první řez, obráběný materiál AISI 309,  $p = 350 \text{ [MPa]}$ ,  $m_a = 400 \text{ [g} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $d_f = 0,8 \text{ [mm]}$ ,  $b = 15 \text{ [mm]}$  při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora  $v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $v = 75 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  a  $v = 150 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$



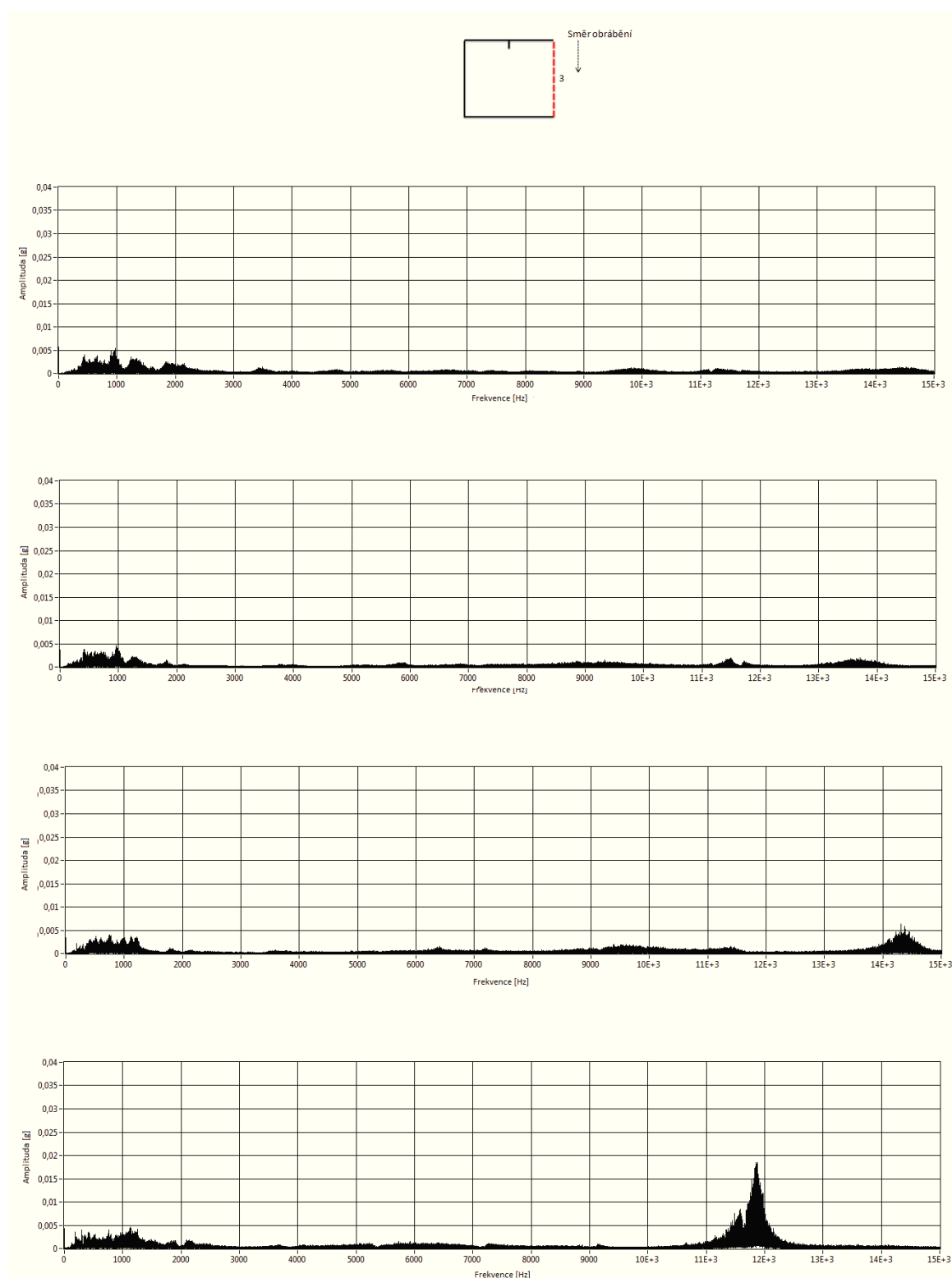
Obr. 4.18 FTT analýza sady vzorků B, druhý řez, obráběný materiál AISI 309,  $p = 350 \text{ [MPa]}$ ,  $m_a = 400 \text{ [g} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $d_f = 0,8 \text{ [mm]}$ ,  $b = 15 \text{ [mm]}$  při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora  $v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $v = 75 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  a  $v = 150 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$



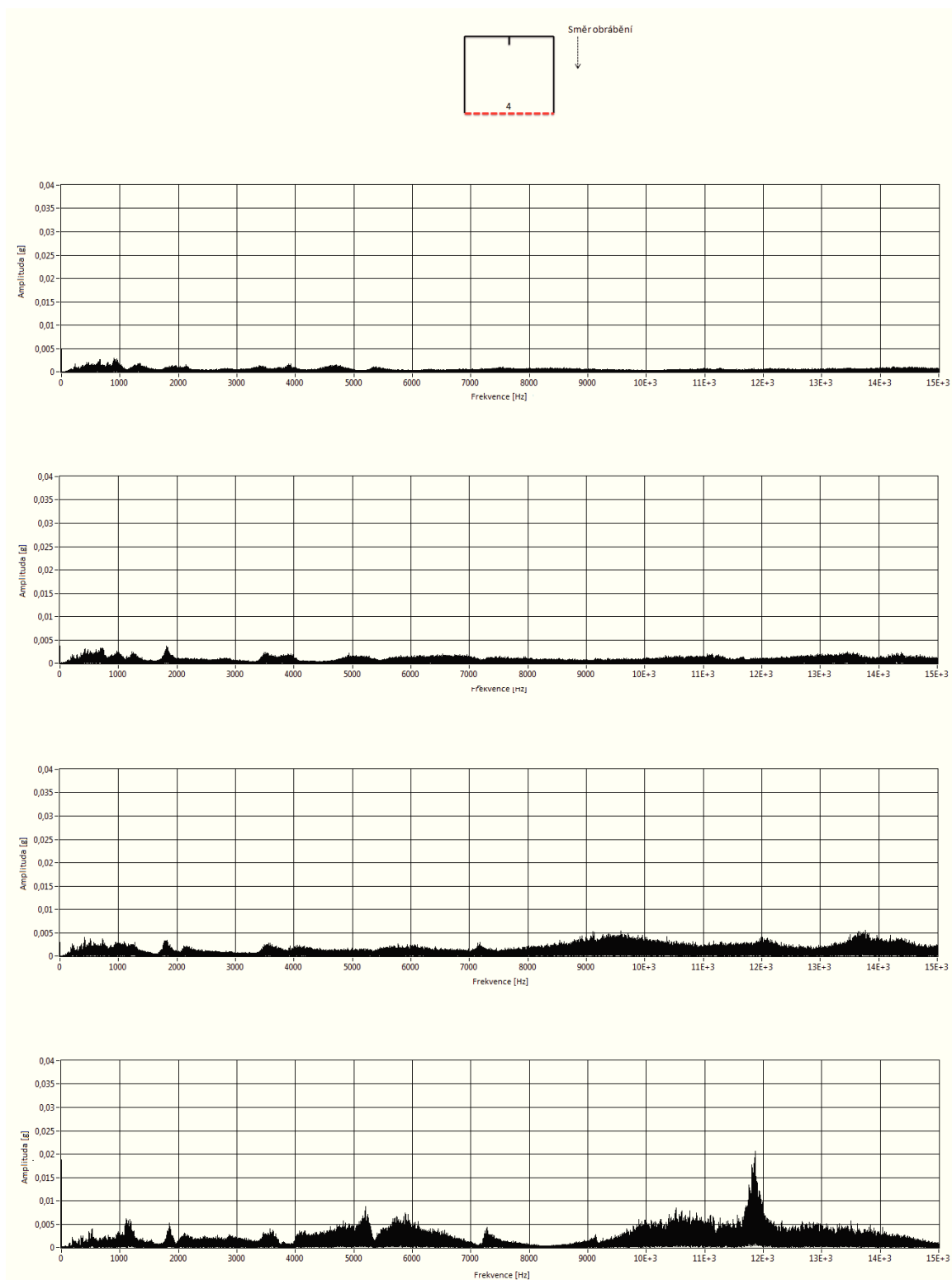
Při FFT analýze akustické emise bloku B vyobrazené na Obr. 4.17 se čtyřmi rychlostmi posuvu řezné hlavy a rozsahem frekvenčního pásma  $2 \div 15$  [kHz] zjišťujeme, že při  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>] nedochází k výraznému nárůstu amplitudy a nabývá nejvyšších hodnot  $\pm 0,005$  [g]. V oblasti frekvencí  $5,5 \div 6,5$  [kHz] u rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 75$  [mm·min<sup>-1</sup>] dochází k nárůstu amplitudy na  $\pm 0,01$  [g] a ve frekvenčním rozsahu  $13 \div 14,5$  [kHz] dochází k nárůstu amplitudy na  $\pm 0,008$  [g]. V oblasti frekvencí  $3,5 \div 4,5$  [kHz] u rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>] dochází k nárůstu amplitudy na  $\pm 0,008$  [g] a ve frekvenčním rozsahu  $13,5 \div 15$  [kHz] dochází k nárůstu amplitudy na  $\pm 0,009$  [g]. U rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 150$  [mm·min<sup>-1</sup>] ve frekvenčním rozsahu  $10,5 \div 14$  [kHz] dochází k výraznému periodickému nárůstu amplitudy na  $\pm 0,04$  [g]. Ve všech zbývajících frekvenčních pásmech při všech zkoumaných rychlostech posuvu řezné hlavy, je hodnota nárůstu amplitudy do maxima  $\pm 0,005$  [g].

Spektrální analýza FFT Bloku B u Obr. 4.18 je následující. U rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>] se ve zkoumané oblasti  $2 \div 15$  [kHz] žádný periodický nárůst amplitud nenachází. U  $v = 75$  [mm·min<sup>-1</sup>] k viditelnému nárůstu amplitud dochází ve dvou případech, jednak v oblasti  $5,5 \div 6,5$  [kHz], kdy je hodnota maxima  $\pm 0,01$  [g], a dále v oblasti  $13 \div 14,5$  [kHz], kdy je velikost maximální amplitudy  $\pm 0,008$  [g]. Při vyšší rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>] dochází k nárůstu amplitudy pouze v jediném bodě a to v oblasti frekvenčního spektra  $13,5 \div 15$  [kHz], který nabývá hodnot maxima  $\pm 0,012$  [g]. V nejvyšší rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 150$  [mm·min<sup>-1</sup>] dochází k výraznějšímu nárůstu amplitudy opětovně pouze v jediném bodě a to v oblasti frekvenčního pole  $11 \div 13$  [kHz], který nabývá hodnot maxima  $\pm 0,016$  [g]. Ve všech zbývajících frekvenčních spektrech při všech zkoumaných rychlostech posuvu řezné hlavy, je hodnota nárůstu amplitudy do maxima  $\pm 0,005$  [g].

Obr. 4.19 znázorňuje provedení spektrální analýzy FFT Bloku B. Po celém zkoumaném frekvenčním rozsahu  $7 \div 15$  [kHz] se neobjevují periodicky narůstající amplitudy, výjimkou tvoří pouze rychlost posuvu řezné hlavy  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>], kde dochází k nárůstu amplitudy v oblasti frekvenčního pásma  $13,5 \div 15$  [kHz], který nabývá hodnot maxima  $\pm 0,006$  [g] a při nejvyšší rychlosti posuvu řezné hlavy, jmenovitě  $v = 150$  [mm·min<sup>-1</sup>], kde dochází k nárůstu amplitudy v oblasti frekvenční oblasti  $11 \div 12,5$  [kHz], který nabývá hodnot maxima  $\pm 0,019$  [g]. Ve všech zbývajících frekvenčních pásmech při všech zkoumaných rychlostech posuvu řezné hlavy, je hodnota nárůstu amplitudy do maxima  $\pm 0,005$  [g].



Obr. 4.19 FTT analýza sady vzorků B, třetí řez, obráběný materiál AISI 309,  $p = 350$  [MPa],  $m_a = 400$  [g·min<sup>-1</sup>],  $d_f = 0,8$  [mm],  $b = 15$  [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>],  $v = 75$  [mm·min<sup>-1</sup>],  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>] a  $v = 150$  [mm·min<sup>-1</sup>]



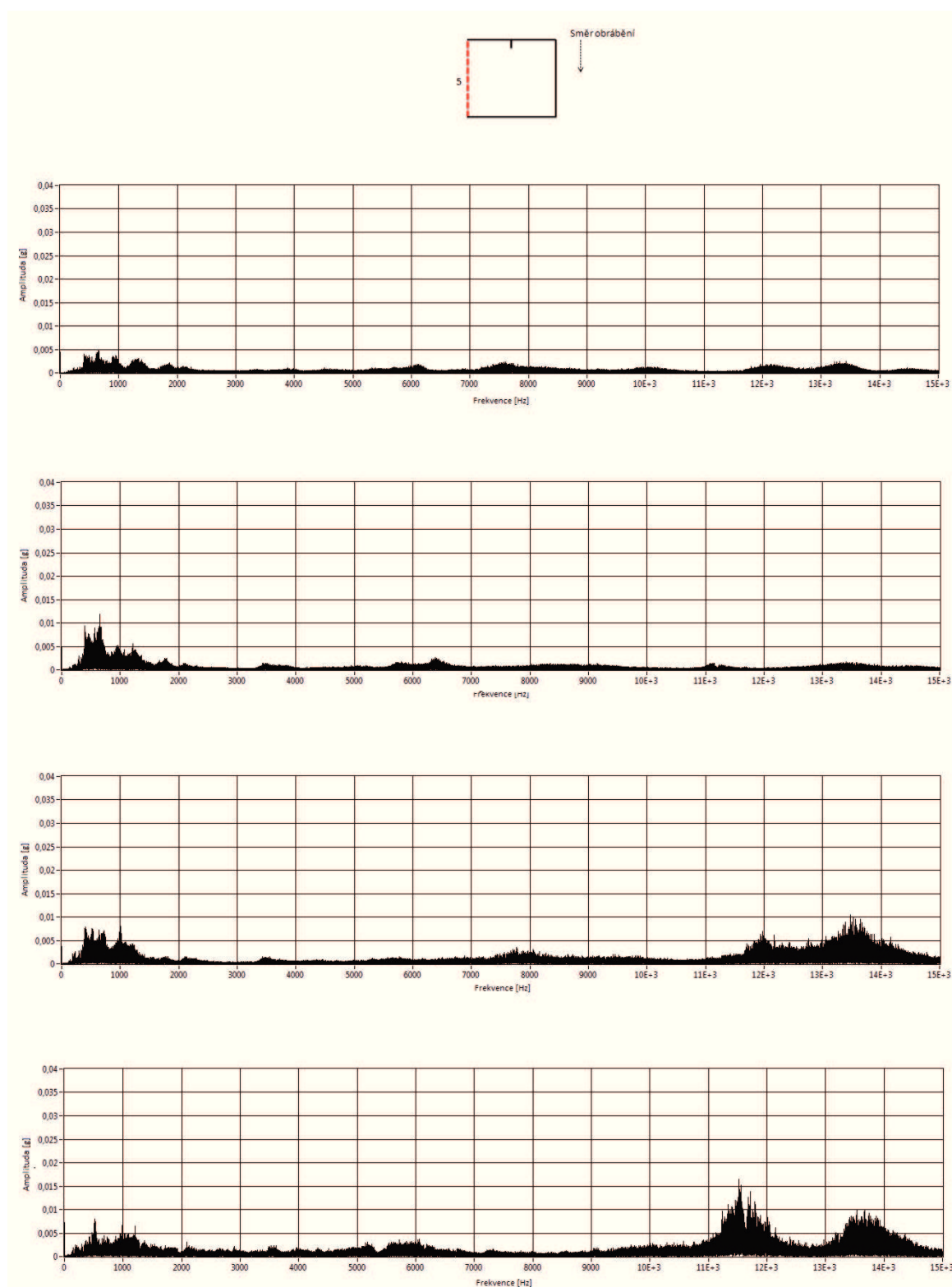
Obr. 4.20 FTT analýza sady vzorků B, čtvrtý řez, obráběný materiál AISI 309,  $p = 350$  [MPa],  $m_a = 400$  [ $g \cdot min^{-1}$ ],  $d_f = 0,8$  [mm],  $b = 15$  [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora  $v = 50$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ],  $v = 75$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ],  $v = 100$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ] a  $v = 150$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ]

U Obr. 4.20, kde je prováděna spektrální analýza FFT Bloku B je situace velmi obdobná jako na Obr. 4.19. Po celém zkoumaném frekvenčním rozsahu  $7 \div 15$  [kHz] se neobjevují periodicky narůstající amplitudy, jedinou výjimkou je nejvyšší rychlost posuvu řezné hlavy  $v = 150$  [mm·min<sup>-1</sup>], kde dochází k nárůstu amplitudy v oblasti frekvenčního spektra  $11,5 \div 12,5$  [kHz], který nabývá hodnot maxima  $\pm 0,021$  [g]. Ve všech zbývajících frekvenčních spektrech při všech zkoumaných rychlostech posuvu řezné hlavy, je hodnota nárůstu amplitudy do maxima  $\pm 0,007$  [g].

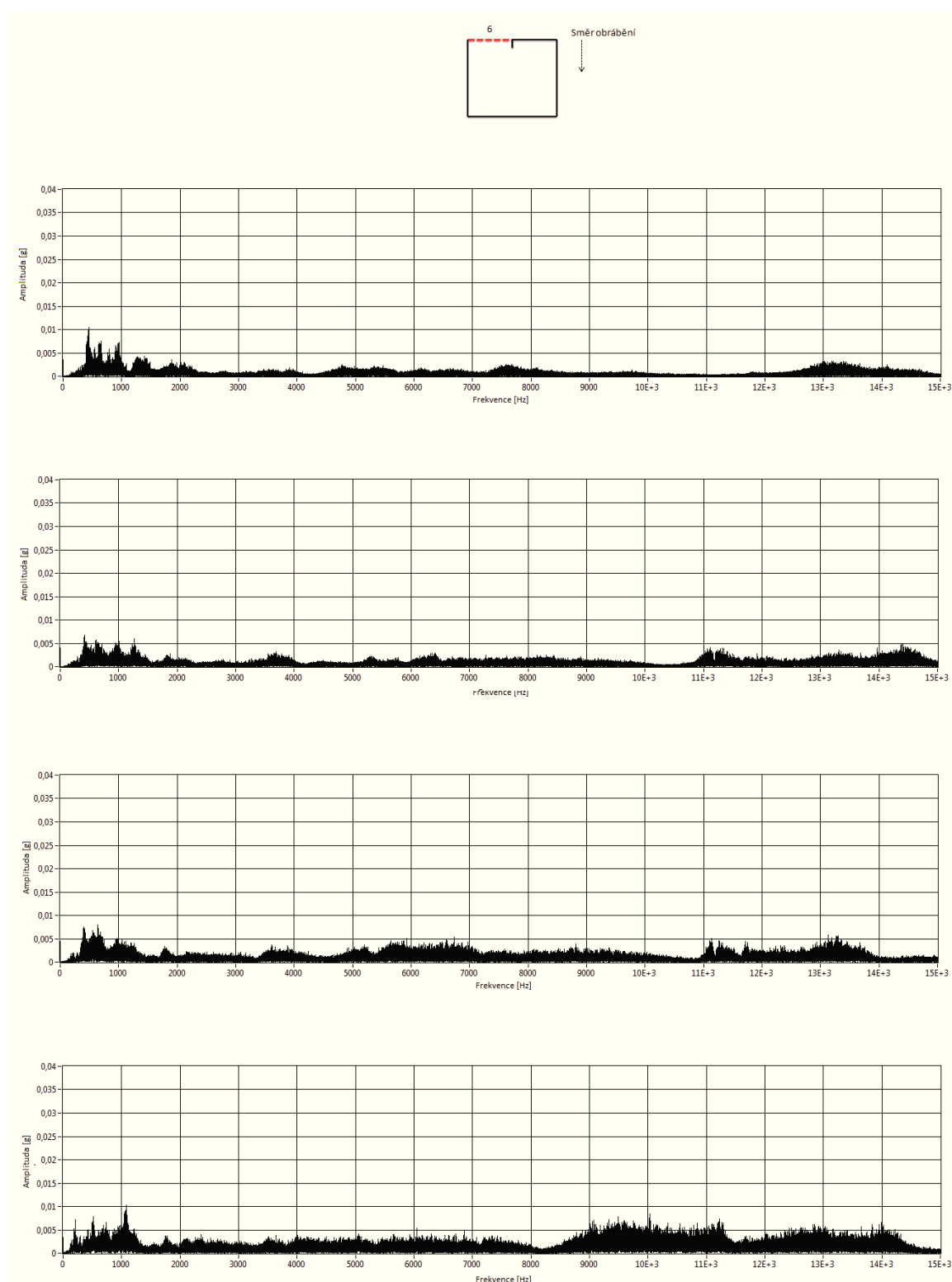
Spektrální analýza FFT Bloku B u Obr. 4.21 je následující. U rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>] se ve zkoumané oblasti  $2 \div 15$  [kHz] periodický nárůst amplitud vyskytuje pouze v oblasti  $12,5 \div 14,5$  [kHz], kdy je hodnota maxima  $\pm 0,011$  [g]. U  $v = 150$  [mm·min<sup>-1</sup>] pozorujeme periodický nárůst amplitudy o frekvenčním rozsahu  $10,5 \div 12,5$  [kHz], který nabývá hodnot  $\pm 0,017$  [g] a dále ve frekvenčním spektru  $12,5 \div 15$  [kHz], kdy je hodnota maxima  $\pm 0,001$  [g] a nakonec v oblasti  $8 \div 9$  [kHz], kdy je hodnota maxima  $\pm 0,015$  [g]. Ve všech zbývajících frekvenčních pásmech při všech zkoumaných rychlost posuvu řezné hlavy hodnota nárůstu amplitudy do maxima  $\pm 0,005$  [g].

Obr. 4.22 znázorňuje realizaci spektrální analýzy FFT Bloku B. Po celém zkoumaném frekvenčním rozsahu  $7 \div 15$  [kHz] se neobjevují periodicky narůstající amplitudy, která dosahuje maxima  $\pm 0,006$  [g].

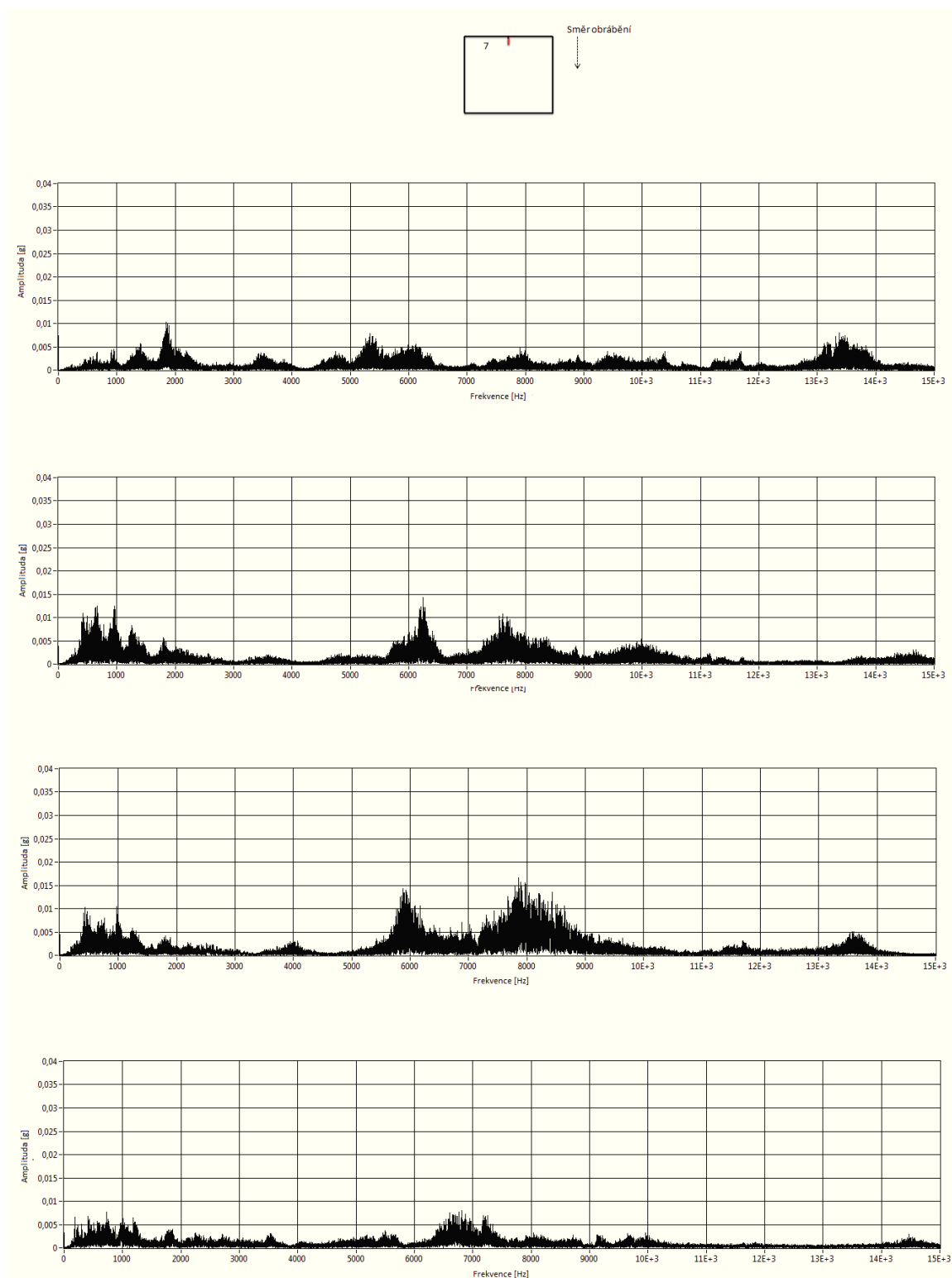
Obr. 4.23 znázorňuje provedení spektrální analýzy FFT Bloku B. Po celém zkoumaném frekvenčním rozsahu  $7 \div 15$  [kHz] se u rychlost posuvu řezné hlavy  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>] neobjevují periodicky narůstající amplitudy. Se zvyšující se rychlostí posuvu řezné hlavy na  $v = 75$  [mm·min<sup>-1</sup>] dochází k vyšší četnosti amplitud a to v oblasti frekvenčního pásma  $5,5 \div 6,5$  [kHz], který nabývá hodnot maxima  $\pm 0,014$  [g] a v oblasti frekvenčního spektra  $7 \div 8,5$  [kHz], který nabývá hodnot maxima  $\pm 0,011$  [g]. Při rychlosti posuvu řezné hlavy na  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>] dochází k periodickému nárůstu amplitudy v oblasti frekvenčního pásma  $5,5 \div 6,5$  [kHz], který nabývá hodnot maxima  $\pm 0,014$  [g] a v oblasti frekvenčního spektra  $7 \div 9$  [kHz], který nabývá hodnot maxima  $\pm 0,016$  [g]. Při nejvyšší rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 150$  [mm·min<sup>-1</sup>], dosahuje nárůstu amplitudy v oblasti frekvenčního spektra  $6,5 \div 7,5$  [kHz] hodnot maxima  $\pm 0,008$  [g]. Ve všech zbývajících frekvenčních pásmech při všech zkoumaných rychlost posuvu řezné hlavy hodnota nárůstu amplitudy do maxima  $\pm 0,005$  [g].



Obr. 4.21 FTT analýza sady vzorků B, pátý řez, obráběný materiál AISI 309,  $p = 350$  [MPa],  $m_a = 400$  [ $g \cdot \text{min}^{-1}$ ],  $d_f = 0,8$  [mm],  $b = 15$  [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora  $v = 50$  [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ],  $v = 75$  [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ],  $v = 100$  [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ] a  $v = 150$  [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ]



Obr. 4.22 FTT analýza sady vzorků B, šestý řez, obráběný materiál AISI 309,  $p = 350 \text{ [MPa]}$ ,  $m_a = 400 \text{ [g} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $d_f = 0,8 \text{ [mm]}$ ,  $b = 15 \text{ [mm]}$  při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora  $v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $v = 75 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  a  $v = 150 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$



Obr. 4.23 FTT analýza sady vzorků B, sedmý řez, obráběný materiál AISI 309,  $p = 350 \text{ [MPa]}$ ,  $m_a = 400 \text{ [g} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $d_f = 0,8 \text{ [mm]}$ ,  $b = 15 \text{ [mm]}$  při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora  $v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $v = 75 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  a  $v = 150 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$

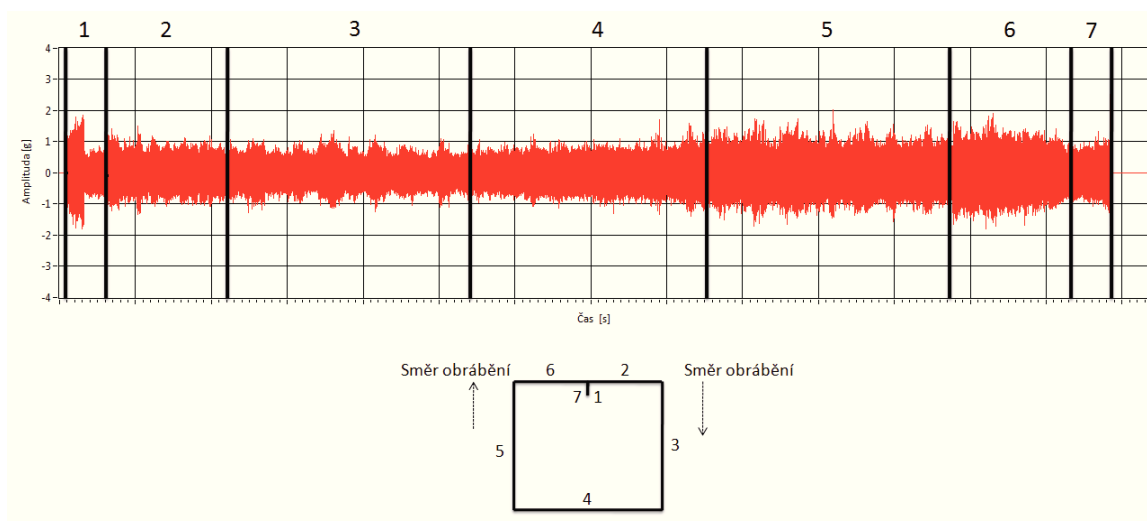
Tab. 4.2 Analýza FFT maximální hodnoty mediánu a peak to peak frekvencí signálů akustické emise u dvou řezných rychlostí na materiálu AISI 309

Sada	Podmínky experimentu	Sledovaná hodnota	1. úsek	2. úsek	3. úsek	4. úsek	5. úsek	6. úsek	7. úsek
B	$v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}\text{]}$ $ma = 250 \text{ [g} \cdot \text{min}^{-1}\text{]}$ $p = 350 \text{ [MPa]}$ $df = 0,8 \text{ [mm]}$ $b = 15 \text{ [mm]}$	Medián [mm]	0,015030	0,013358	0,014825	0,018271	0,018858	0,021832	0,0085724
		Peak to peak [g]	2,93427	4,41579	4,367	2,91156	5,67254	6,59368	7,47425
B	$v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}\text{]}$ $ma = 250 \text{ [g} \cdot \text{min}^{-1}\text{]}$ $p = 350 \text{ [MPa]}$ $df = 0,8 \text{ [mm]}$ $b = 15 \text{ [mm]}$	Medián [mm]	-0,01408	0,013077	0,028570	0,025329	0,0189224	0,018514	0,0186353
		Peak to peak [g]	4,91489	4,29344	7,71887	7,71332	9,76958	5,42596	3,60428



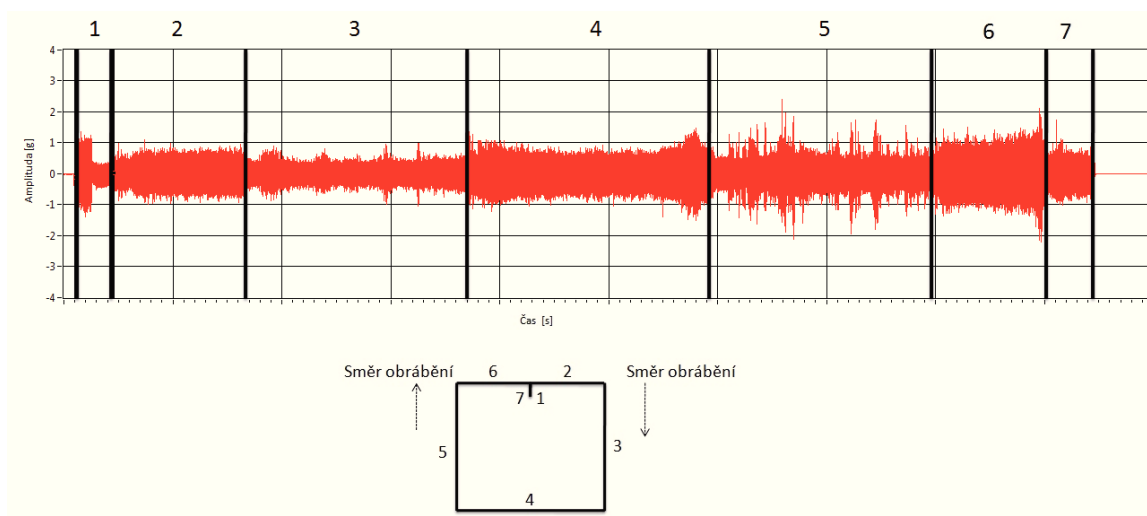
### 4.3 SADA VZORKŮ C

Sada vzorků C se bude zpracovávat obdobným způsobem jako Sada A, rozdíl je pouze v zaostřovací trubicí která má průměr  $d_f = 1,4$  [mm]. Dále nutno dodat že se jednalo o již použitou (opotřebovanou) zaostřovací trubicí.



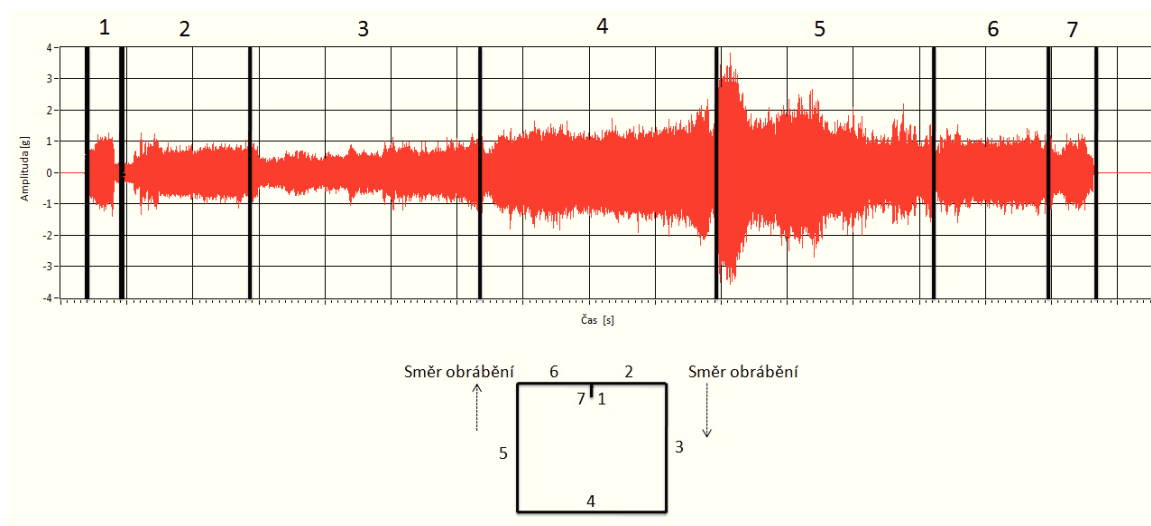
Obr. 4.24 Průběh signálu akustické emise, sada vzorků C, obráběný materiál AISI 309,  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>],  $p = 350$  [MPa],  $m_a = 400$  [g·min<sup>-1</sup>],  $d_f = 1,4$  [mm],  $b = 15$  [mm]

Průběh zobrazený na Obr. 4.24 měl následující nastavení vstupních parametrů: obráběný materiál byl AISI 309, rychlost posuvu řezné hlavy  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>], generovaný tlak byl  $p = 350$  [MPa], hmotnostní tok abraziva  $m_a = 400$  [g·min<sup>-1</sup>], materiál byl obráběn použitou (opotřebovanou) zaostřovací trubicí o průměru  $d_f = 1,4$  [mm] a tloušťka obráběného materiálu  $b = 15$  [mm]. Použité abrazivo bylo typu Barton Garnet o MESH 80.



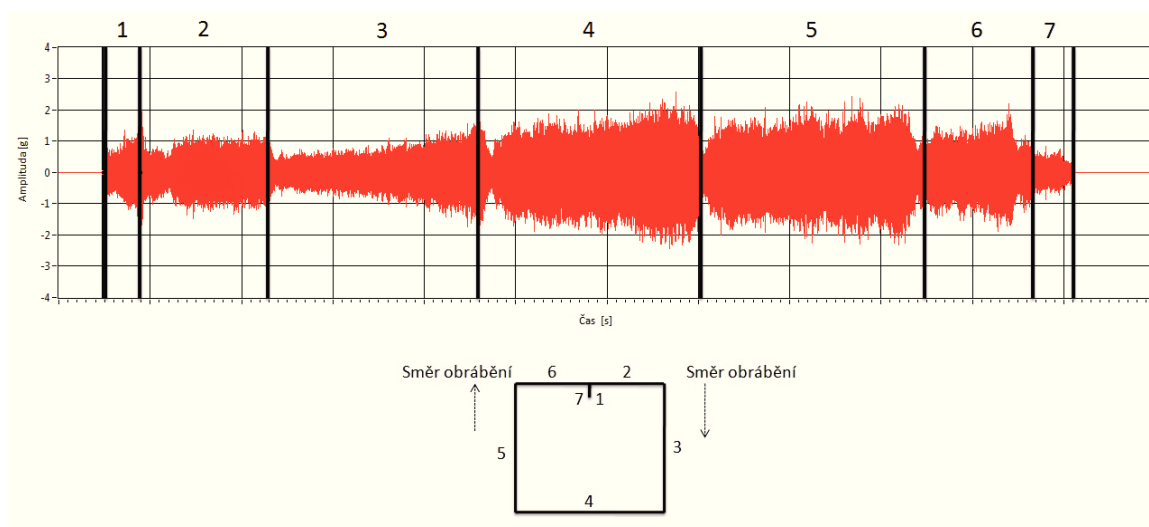
Obr. 4.25 Průběh signálu akustické emise, sada vzorků C, obráběný materiál AISI 309,  $v = 75$  [mm·min<sup>-1</sup>],  $p = 350$  [MPa],  $m_a = 400$  [g·min<sup>-1</sup>],  $d_f = 1,4$  [mm],  $b = 15$  [mm]

Obr. 4.25 měl následující nastavení vstupních parametrů: obráběný materiál byl AISI 309, rychlost posuvu řezné hlavy byla změněna na  $v = 75 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ , generovaný tlak byl  $p = 350 \text{ [MPa]}$ , hmotnostní tok abraziva  $m_a = 400 \text{ [g} \cdot \text{min}^{-1}]$ , materiál byl obráběn použitou (opotřebovanou) zaostřovací trubicí o průměru  $d_f = 1,4 \text{ [mm]}$  a tloušťka obráběného materiálu byla opět  $b = 15 \text{ [mm]}$ . Použité abrazivo bylo typu Barton Garnet o MESH 80.



Obr. 4.26 Průběh signálu akustické emise, sada vzorků C, obráběný materiál AISI 309,  $v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $p = 350 \text{ [MPa]}$ ,  $m_a = 400 \text{ [g} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $d_f = 1,4 \text{ [mm]}$ ,  $b = 15 \text{ [mm]}$

Na Obr. 4.26 bylo následující nastavení vstupních parametrů: obráběný materiál byl AISI 309, rychlost posuvu řezné hlavy byla změněna na  $v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ , generovaný tlak  $p = 350 \text{ [MPa]}$ , hmotnostní tok abraziva  $m_a = 400 \text{ [g} \cdot \text{min}^{-1}]$ , materiál byl obráběn použitou (opotřebovanou) zaostřovací trubicí o průměru  $d_f = 1,4 \text{ [mm]}$  a tloušťka obráběného materiálu  $b = 15 \text{ [mm]}$ . Použité abrazivo bylo typu Barton Garnet o MESH 80.



Obr. 4.27 Průběh signálu akustické emise, sada vzorků C, obráběný materiál AISI 309,  $v = 150 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $p = 350 \text{ [MPa]}$ ,  $m_a = 400 \text{ [g} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $d_f = 1,4 \text{ [mm]}$ ,  $b = 15 \text{ [mm]}$

Na posledním záznamu (Obr. 4.27) bylo následující nastavení vstupních parametrů: obráběný materiál byl AISI 309, rychlost posuvu řezné hlavy byla změněna na  $v = 150 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ , generovaný tlak byl  $p = 350 \text{ [MPa]}$ , hmotnostní tok abraziva  $m_a = 400 \text{ [g} \cdot \text{min}^{-1}]$ , materiál byl obráběn použitou (opotřebovanou) zaostřovací trubicí o průměru  $d_f = 1,4 \text{ [mm]}$  a tloušťka obráběného materiálu  $b = 15 \text{ [mm]}$ . Použité abrazivo bylo typu Barton Garnet o MESH 80.

Všeobecně lze konstatovat, že v úseku 1 na všech výše uvedených obrázcích (Obr. 4.24, Obr. 4.25, Obr. 4.26 a Obr. 4.27) dochází ke zvýšení amplitud, přičemž u rychlostí posuvu řezné hlavy  $v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  do hodnot  $\pm 2 \text{ [g]}$  a při  $v = 75 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  a  $v = 150 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  do hodnot  $\pm 1,5 \text{ [g]}$  z důvodu prvotního průniku hydroabrazivního proudu. Jedná se o jev v délce trvání cca  $2 \div 3$  sekundy, po průniku materiálem se amplituda řezu zmenšuje.

Úsek 2 provází převážně klidové působení bez větších výkyvů amplitud. Při  $v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $v = 75 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  a  $v = 150 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  dosahuje maximálně hodnot  $\pm 1,5 \text{ [g]}$ .

Úsek 3, vykazuje převážně klidové působení bez větších výkyvů amplitud. Při  $v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  a  $v = 75 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ , dosahujících do maximálních hodnot  $\pm 1,3 \text{ [g]}$ . Při zvyšování rychlosti posuvu řezné hlavy na  $v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  a  $v = 150 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  dochází v tomto úseku k mírnému kolísání amplitudy do maximálních hodnot  $\pm 1,7 \text{ [g]}$ .

Úsek 4, vykazuje u rychlostí posuvu řezné hlavy  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>],  $v = 75$  [mm·min<sup>-1</sup>] a  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>] rozměrově symetrické amplitudy do maximálních hodnot u  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>]  $\pm 1,5$  [g], u  $v = 75$  [mm·min<sup>-1</sup>]  $\pm 1,3$  [g] a u  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>]  $\pm 2,2$  [g]. Při zvyšování rychlosti posuvu řezné hlavy na  $v = 150$  [mm·min<sup>-1</sup>] dochází v tomto úseku k nestabilnímu řezu. Amplituda zde dosahuje maximálních hodnot  $\pm 2,5$  [g].

V úseku 5 dochází k nestabilnímu řezu ve všech výše uvedených obrázcích, (Obr. 4.24, Obr. 4.25, Obr. 4.26 a Obr. 4.27) a to do maximálních hodnot u  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>]  $\pm 1,7$  [g], u  $v = 75$  [mm·min<sup>-1</sup>]  $\pm 2,2$  [g], u  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>]  $\pm 4$  [g] a u  $v = 150$  [mm·min<sup>-1</sup>]  $\pm 2,5$  [g].

Úsek 6, vykazuje u Obr. 4.24, Obr. 4.25, Obr. 4.26 a Obr. 4.27 mírně kolísání amplitudy do maximálních hodnot  $\pm 2,1$  [g].

Úsek 7, vykazuje u Obr. 4.24, Obr. 4.25, Obr. 4.26 obdobně mírně kolísání amplitudy do maximálních hodnot  $\pm 1,4$  [g]. Při zvyšování rychlosti posuvu řezné hlavy na  $v = 150$  [mm·min<sup>-1</sup>] se hodnota amplitudy pohybuje v maximálních hodnotách  $\pm 1$  [g].

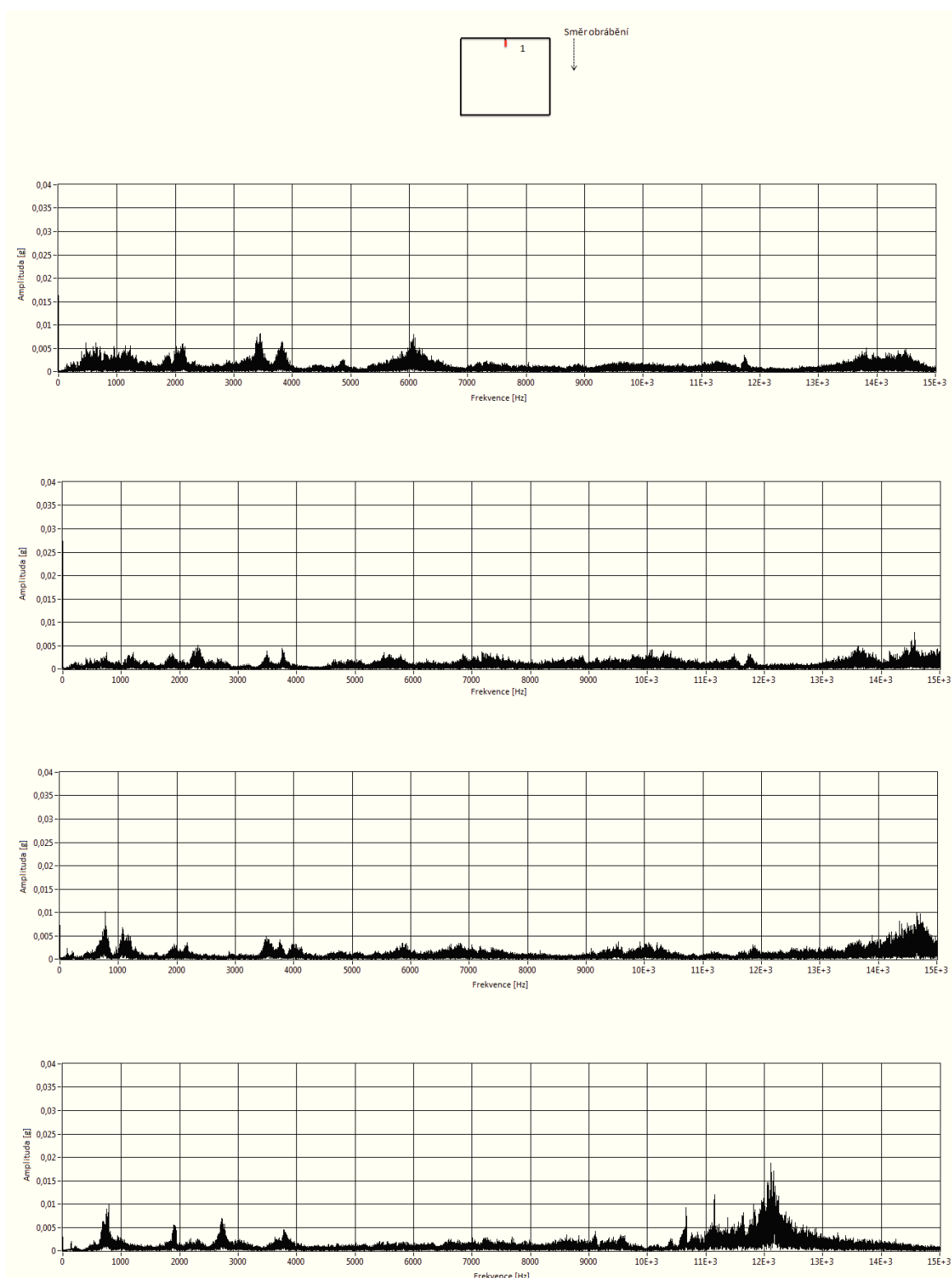
U rychlostí posuvu řezné hlavy  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>],  $v = 75$  [mm·min<sup>-1</sup>] a se jeví jako nejstabilnější úsek č. 3, se zvyšující se rychlosti posuvu řezné hlavy na  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>] a  $v = 150$  [mm·min<sup>-1</sup>] se jeví jako nejstabilnější úsek č. 2.

Jako nejnestabilnější úsek se u všech rychlostí pohybu řezné hlavy jeví úsek č. 5

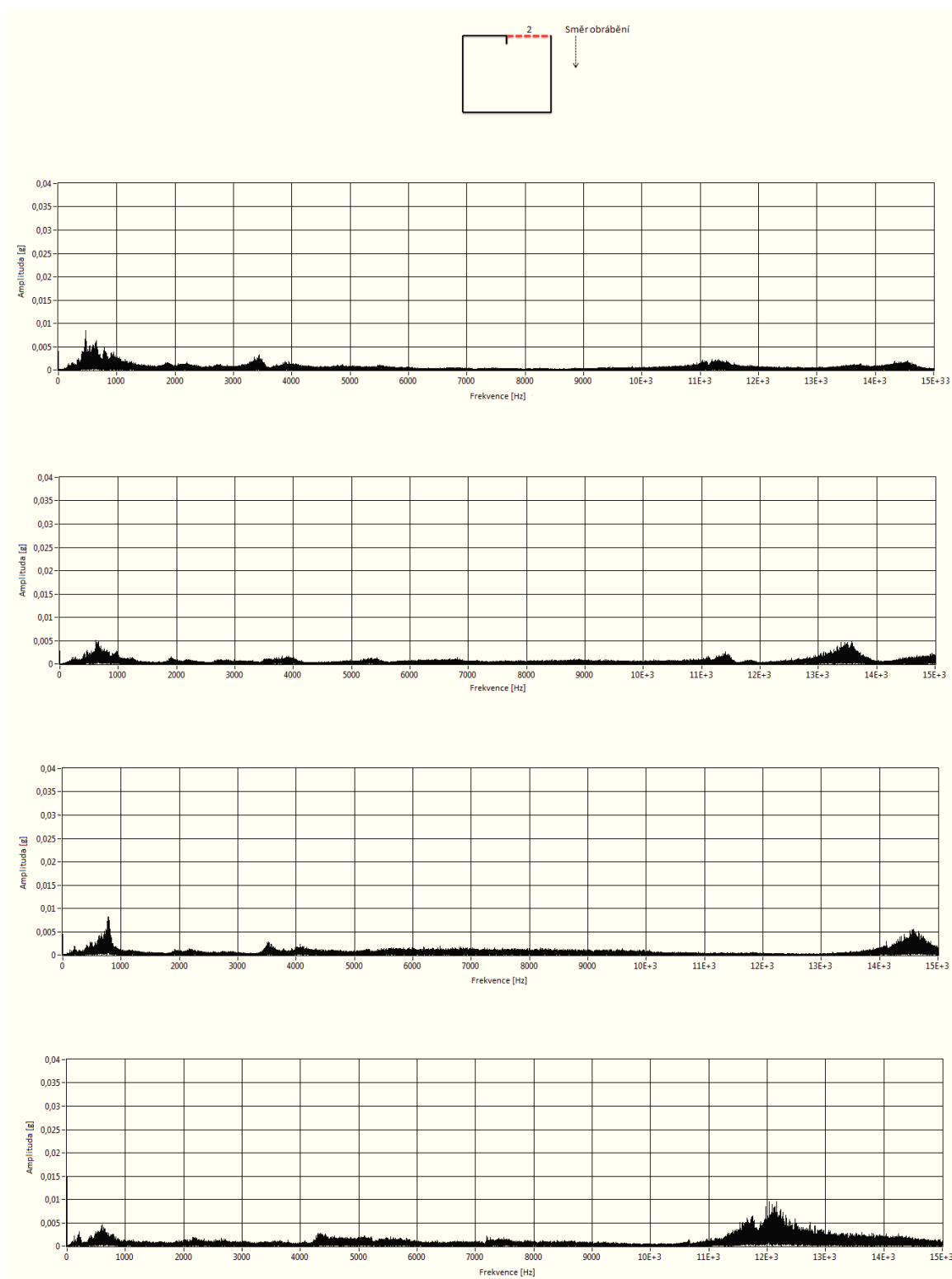
### 4.3.1 FFT Analýza vzorků C

Sada vzorků C se bude zpracovávat obdobným způsobem FFT analýzy jako Sadu A (viz. 4.1.1), rozdíl je pouze v zaostřovací trubicí která má průměr  $d_f = 1,4$  [mm]. Dále nutno dodat, že se jednalo o již použitou (opotřebovanou) zaostřovací trubicí.

Při FFT analýze akustické emise bloku C vyobrazené na Obr. 4.28 se čtyřmi rychlostmi posuvu řezné hlavy a rozsahem frekvenčního pásma  $2 \div 15$  [kHz] zjišťujeme, že při  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>] dochází k mírnému periodickému nárůstu amplitud ve třech případech, jednak v oblasti  $3 \div 4$  [kHz], kdy je hodnota maxima  $\pm 0,008$  [g], dále v oblasti  $5 \div 7$  [kHz], kdy je velikost maximální amplitudy opět  $\pm 0,008$  [g] a nakonec v oblasti  $13 \div 15$  [kHz], kdy je velikost maximální amplitudy  $\pm 0,006$  [g]. U rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 75$  [mm·min<sup>-1</sup>] dochází k nárůstu amplitudy na  $\pm 0,008$  [g] ve frekvenčním rozsahu  $13 \div 15$  [kHz]. U další rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>] dochází k nárůstu amplitudy na  $\pm 0,01$  [g] a to ve frekvenčním rozsahu  $13,5 \div 15$  [kHz].



Obr. 4.28 FTT analýza sady vzorků C, první řez, obráběný materiál AISI 309,  $p = 350$  [MPa],  $m_a = 400$  [g·min<sup>-1</sup>],  $d_f = 1,4$  [mm],  $b = 15$  [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>],  $v = 75$  [mm·min<sup>-1</sup>],  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>] a  $v = 150$  [mm·min<sup>-1</sup>]



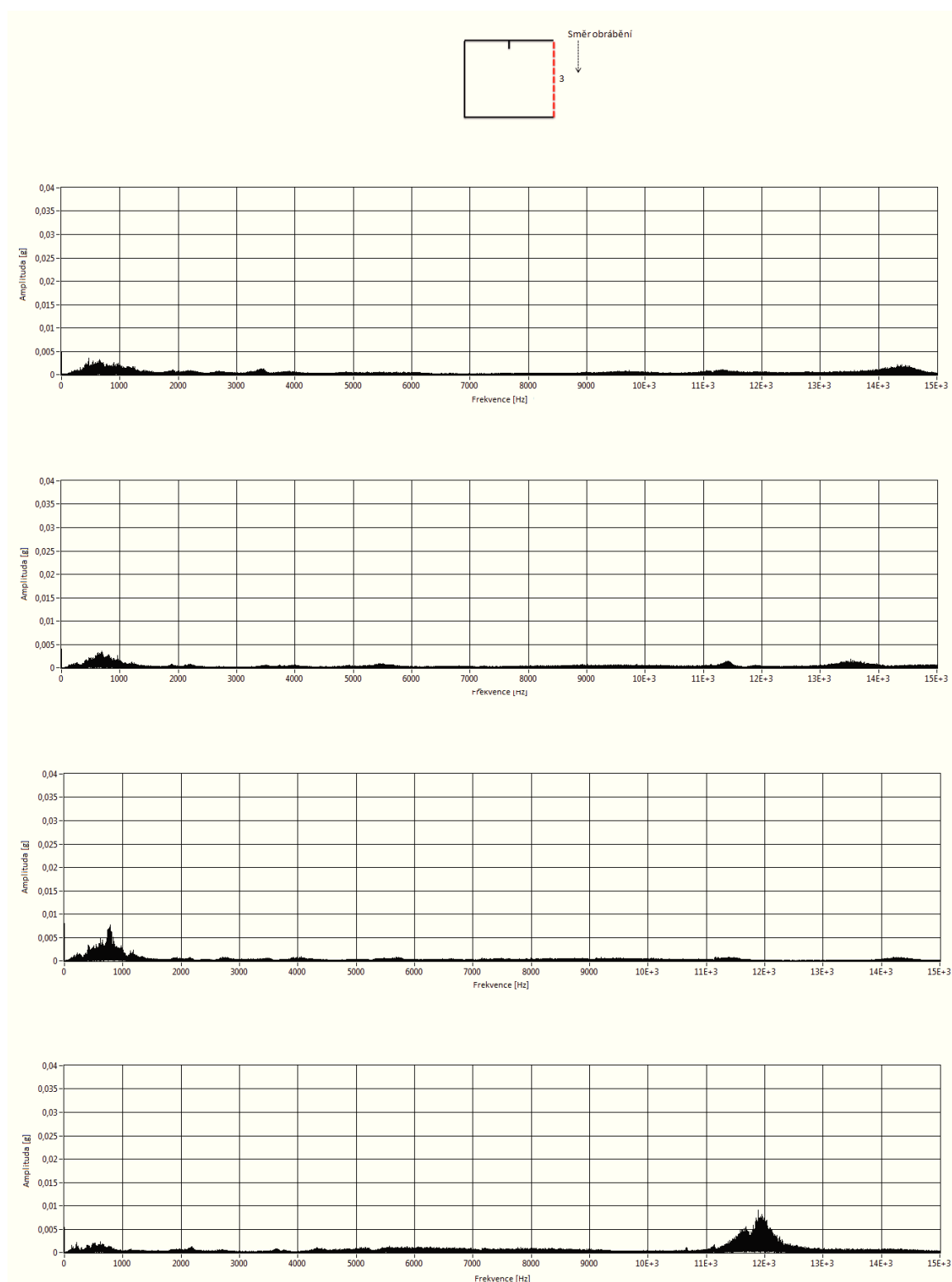
Obr. 4.29 FTT analýza sady vzorků C, druhý řez, obráběný materiál AISI 309,  $p = 350$  [MPa],  $m_a = 400$  [ $g \cdot min^{-1}$ ],  $d_f = 1,4$  [mm],  $b = 15$  [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora  $v = 50$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ],  $v = 75$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ],  $v = 100$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ] a  $v = 150$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ]

V nejvyšší rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 150 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  dochází k výraznějšímu nárůstu amplitudy ve dvou oblastech, a to v oblasti frekvenčního spektra  $2,5 \div 3 \text{ [kHz]}$ , který nabývá hodnot maxima  $\pm 0,007 \text{ [g]}$  a dále v oblasti frekvenčního pole  $10,5 \div 13,5 \text{ [kHz]}$ , který nabývá hodnot maxima  $\pm 0,017 \text{ [g]}$ . Ve všech zbývajících frekvenčních spektrech při všech zkoumaných rychlostech posuvu řezné hlavy, je hodnota nárůstu amplitudy do maxima  $\pm 0,0034 \text{ [g]}$ .

Spektrální analýza FFT Bloku C u Obr. 4.29 je následující. U rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  se ve zkoumané oblasti  $2 \div 15 \text{ [kHz]}$  žádný periodický nárůst amplitud nenachází. U  $v = 75 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  k viditelnému nárůstu amplitud dochází ve dvou případech, jednak v oblasti  $12,5 \div 14 \text{ [kHz]}$ , kdy je hodnota maxima  $\pm 0,006 \text{ [g]}$ , a dále v oblasti  $14 \div 15 \text{ [kHz]}$ , kdy je velikost maximální amplitudy  $\pm 0,004 \text{ [g]}$ . Při vyšší rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  dochází k nárůstu amplitudy pouze v jediném bodě a to v oblasti frekvenčního spektra  $13,5 \div 15 \text{ [kHz]}$ , který nabývá hodnot maxima  $\pm 0,006 \text{ [g]}$ . V nejvyšší rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 150 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  dochází k výraznějšímu nárůstu amplitudy opětovně pouze v jediném bodě a to v oblasti frekvenčního pole  $11,5 \div 14 \text{ [kHz]}$ , který nabývá hodnot maxima  $\pm 0,009 \text{ [g]}$ . Ve všech zbývajících frekvenčních spektrech při všech zkoumaných rychlostech posuvu řezné hlavy, je hodnota nárůstu amplitudy do maxima  $\pm 0,003 \text{ [g]}$ .

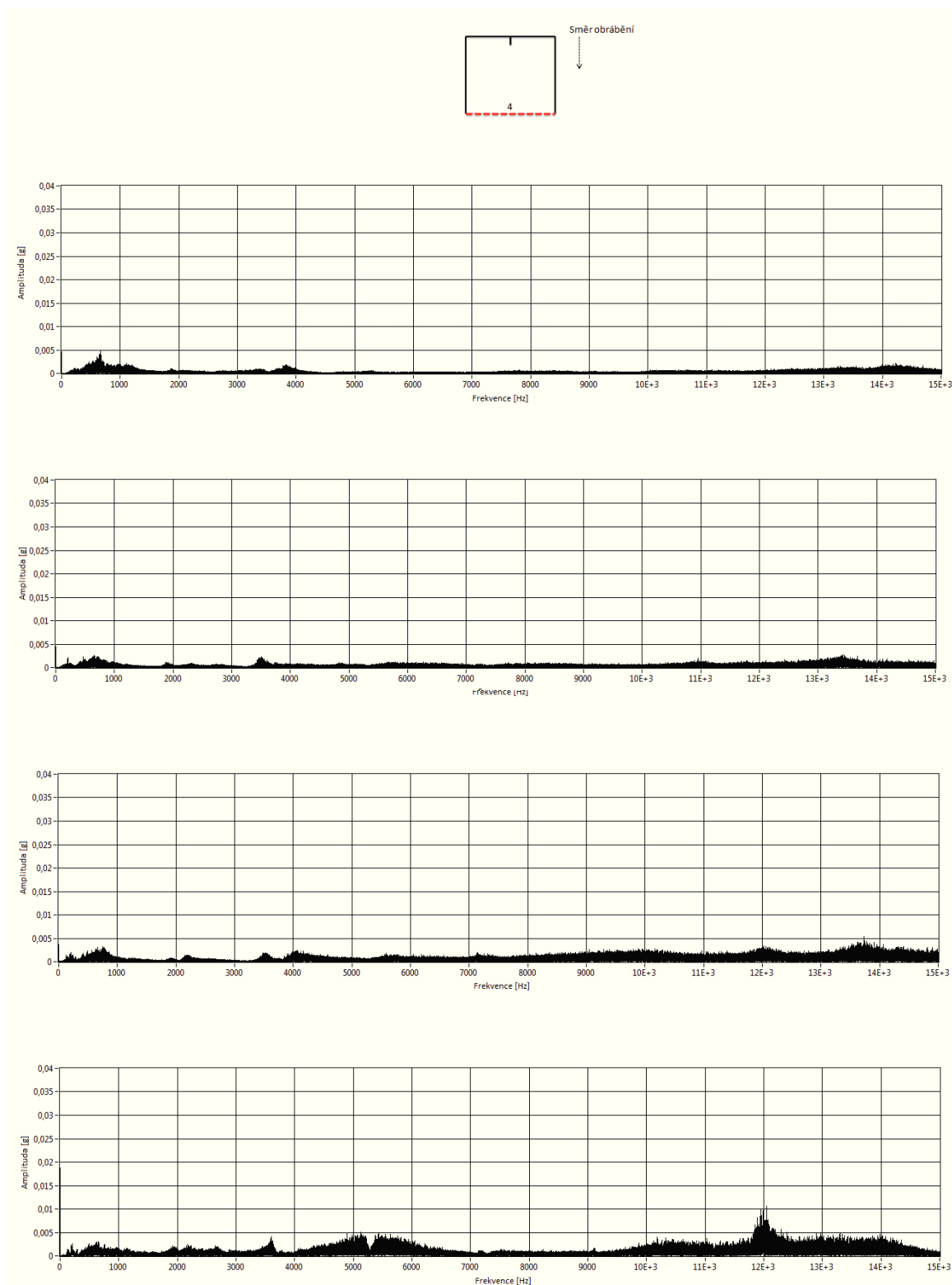
Obr. 4.30 znázorňuje provedení spektrální analýzy FFT Bloku C. Po celém zkoumaném frekvenčním rozsahu  $7 \div 15 \text{ [kHz]}$  se neobjevují periodicky narůstající amplitudy, výjimkou tvoří pouze nejvyšší rychlost posuvu řezné hlavy  $v = 150 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ , kde dochází k nárůstu amplitudy v oblasti frekvenčního pásma  $11 \div 13 \text{ [kHz]}$  který nabývá hodnot maxima  $\pm 0,009 \text{ [g]}$ . Ve všech zbývajících frekvenčních pásmech při všech zkoumaných rychlostech posuvu řezné hlavy, je hodnota nárůstu amplitudy do maxima  $\pm 0,003 \text{ [g]}$ .

U Obr. 4.31, kde je prováděna spektrální analýza FFT Bloku C je situace velmi obdobná jako na Obr. 4.30. Po celém zkoumaném frekvenčním rozsahu  $7 \div 15 \text{ [kHz]}$  se neobjevují periodicky narůstající amplitudy, výjimkou je rychlost posuvu řezné hlavy  $v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ , kde dochází k nárůstu amplitudy v oblasti frekvenčního spektra  $13 \div 14,5 \text{ [kHz]}$ , který nabývá hodnot maxima  $\pm 0,006 \text{ [g]}$ . Při nejvyšší rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 150 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ , dosahuje nárůstu amplitudy v oblasti frekvenčního spektra  $4,5 \div 6,5 \text{ [kHz]}$  hodnot maxima  $\pm 0,006 \text{ [g]}$  a dále v oblasti frekvenčního spektra  $11 \div 13 \text{ [kHz]}$  hodnot maxima  $\pm 0,011 \text{ [g]}$ . Ve všech zbývajících frekvenčních pásmech při všech zkoumaných rychlostech posuvu řezné hlavy hodnota nárůstu amplitudy do maxima  $\pm 0,003 \text{ [g]}$ .



Obr. 4.30 FTT analýza sady vzorků C, třetí řez, obráběný materiál AISI 309,  $p = 350 \text{ [MPa]}$ ,  $m_a = 400 \text{ [g} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $d_f = 1,4 \text{ [mm]}$ ,  $b = 15 \text{ [mm]}$  při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora  $v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $v = 75 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  a  $v = 150 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$



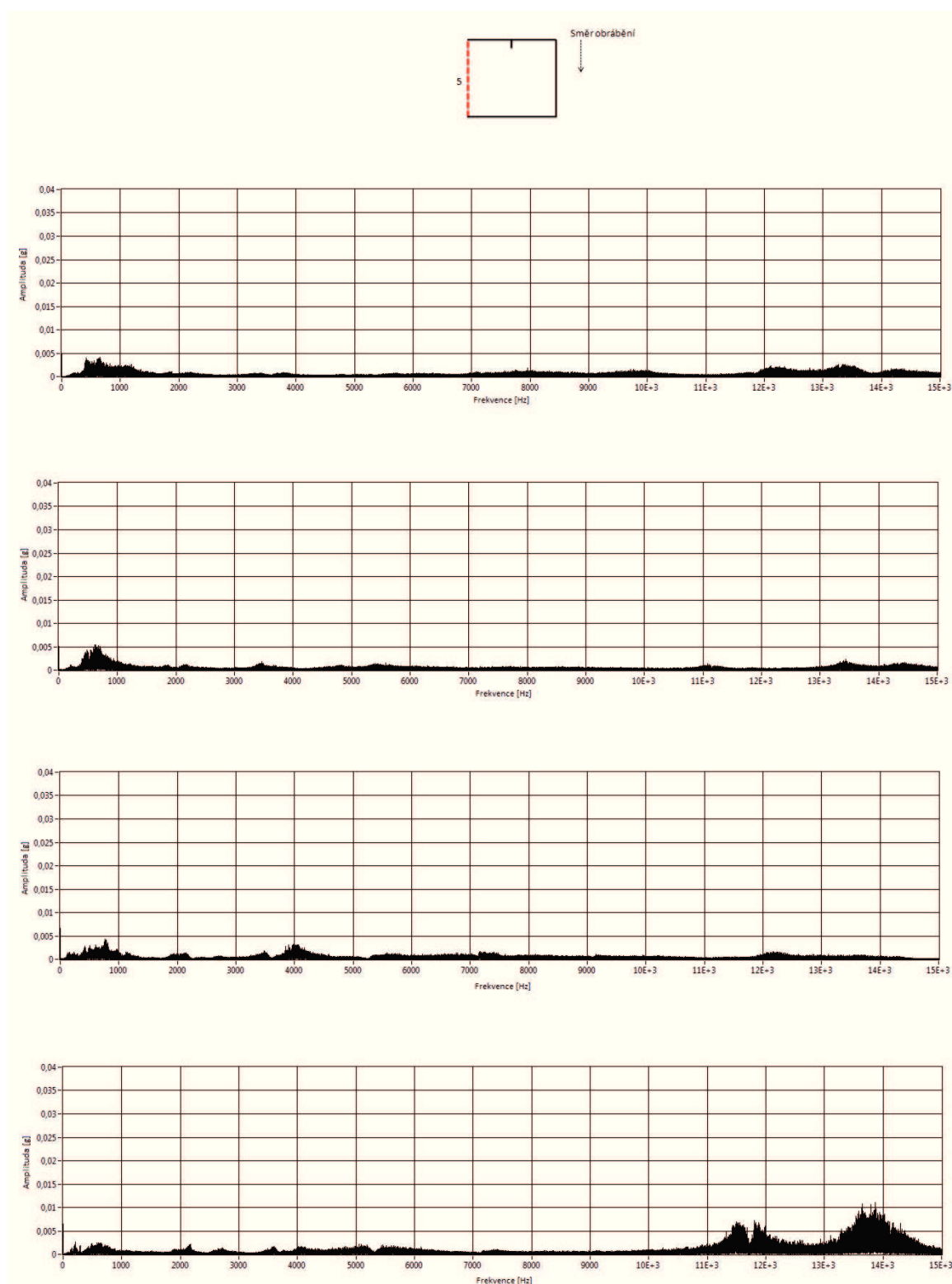


Obr. 4.31 FTT analýza sady vzorků C, čtvrtý řez, obráběný materiál AISI 309,  $p = 350 \text{ [MPa]}$ ,  $m_a = 400 \text{ [g} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $d_f = 1,4 \text{ [mm]}$ ,  $b = 15 \text{ [mm]}$  při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora  $v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $v = 75 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  a  $v = 150 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$

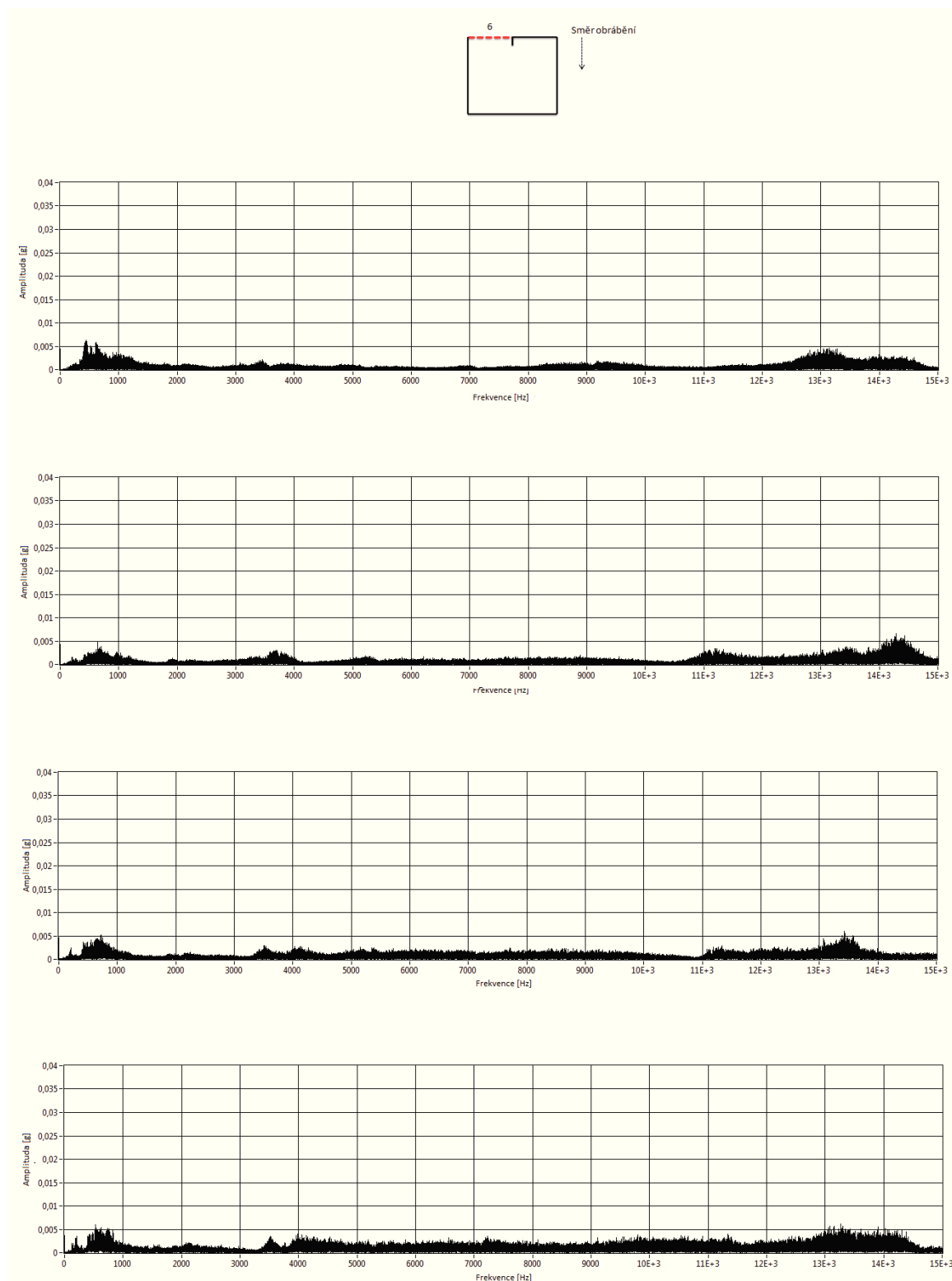
Spektrální analýza FFT Bloku C u Obr. 4.32 je následující. U rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  se ve zkoumané oblasti  $2 \div 15 \text{ [kHz]}$  periodický nárůst amplitud vyskytuje pouze v oblasti  $3,5 \div 4,5 \text{ [kHz]}$ , kdy je hodnota maxima  $\pm 0,004 \text{ [g]}$ . U  $v = 150 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  pozorujeme periodický nárůst amplitudy o frekvenčním rozsahu  $11 \div 12,5 \text{ [kHz]}$ , který nabývá hodnot  $\pm 0,007 \text{ [g]}$  a nakonec v oblasti  $12,5 \div 15 \text{ [kHz]}$ , kdy je hodnota maxima  $\pm 0,012 \text{ [g]}$ . Ve všech zbývajících frekvenčních pásmech při všech zkoumaných rychlost posuvu řezné hlavy hodnota nárůstu amplitudy do maxima je  $\pm 0,003 \text{ [g]}$ .

Obr. 4.33 znázorňuje realizaci spektrální analýzy FFT Bloku C. Po celém zkoumaném frekvenčním rozsahu  $7 \div 15 \text{ [kHz]}$  se objevují periodicky narůstající amplitudy velmi zřídka, u rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  dochází k výskytu amplitudy v oblasti frekvenčního pásma  $12,5 \div 14,5 \text{ [kHz]}$ , který nabývá hodnot maxima  $\pm 0,006 \text{ [g]}$ . U další rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 75 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  dochází k výskytu amplitudy v oblasti frekvenčního spektra  $13 \div 15 \text{ [kHz]}$ , který nabývá hodnot maxima  $\pm 0,007 \text{ [g]}$ . Při zvýšené rychlosti posuvu řezné hlavy na  $v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  dochází v oblasti frekvenčního pásma  $12,5 \div 14 \text{ [kHz]}$ , který nabývá hodnot maxima  $\pm 0,006 \text{ [g]}$ . Při nejvyšší rychlosti posuvu řezné hlavy a to  $v = 150 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ , dosahuje nárůstu amplitudy v oblasti frekvenčního spektra  $12,5 \div 14,5 \text{ [kHz]}$  hodnot maxima  $\pm 0,006 \text{ [g]}$ . Ve všech zbývajících frekvenčních pásmech při všech zkoumaných rychlost posuvu řezné hlavy hodnota nárůstu amplitudy do maxima je  $\pm 0,003 \text{ [g]}$ .

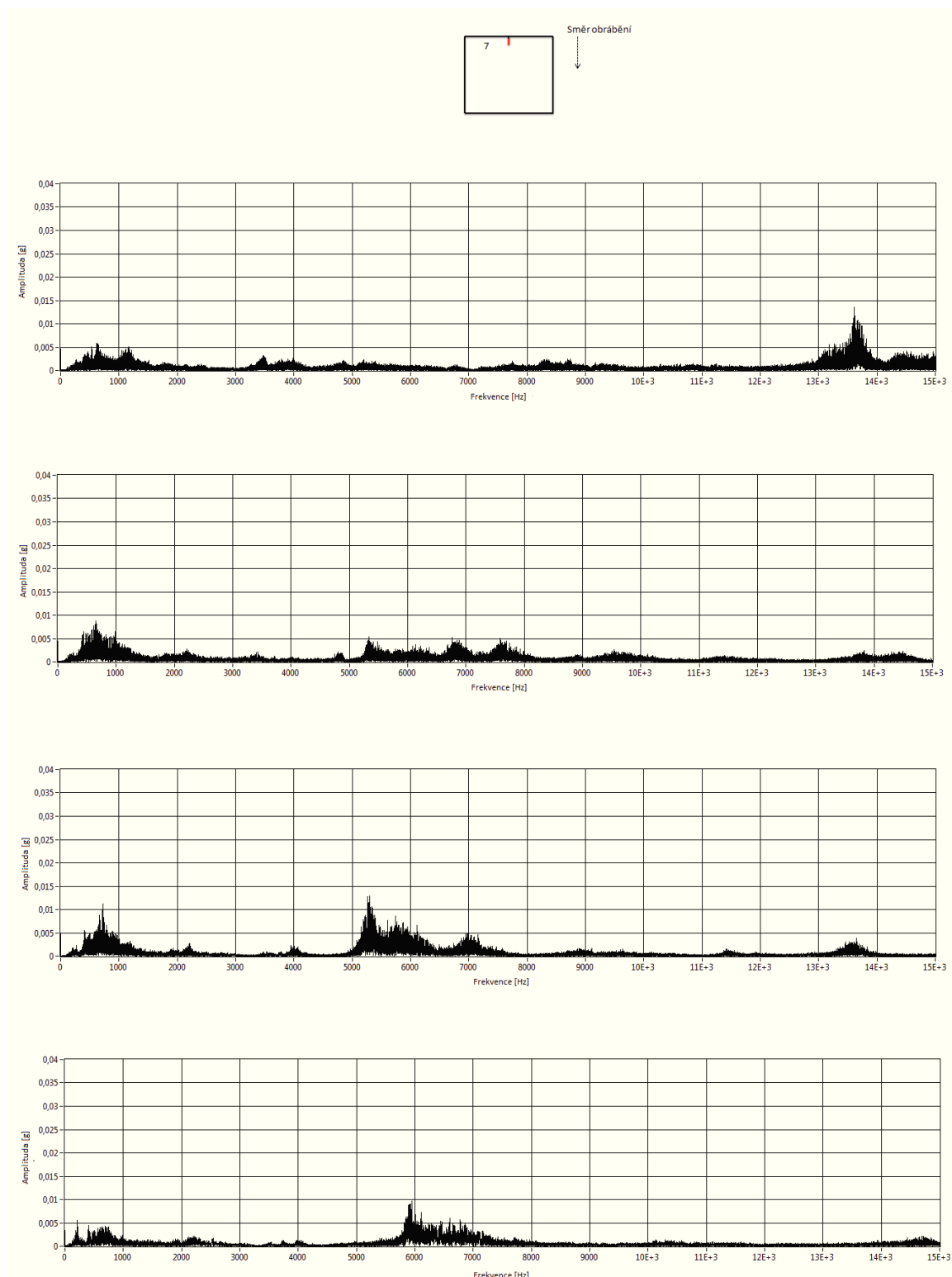
Obr. 4.34 znázorňuje provedení spektrální analýzy FFT Bloku C. Po celém zkoumaném frekvenčním rozsahu  $7 \div 15 \text{ [kHz]}$  se u všech rychlostí posuvu řezné hlavy objevují periodicky narůstající amplitudy. U  $v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  v oblasti frekvenčního pásma  $13 \div 14 \text{ [kHz]}$  který nabývá hodnot maxima  $\pm 0,014 \text{ [g]}$ . Se zvyšující se rychlostí posuvu řezné hlavy na  $v = 75 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  dochází k vyšší četnosti amplitud a to v oblastech frekvenčního pásma  $5 \div 6 \text{ [kHz]}$ ,  $6 \div 7 \text{ [kHz]}$  a  $7 \div 8 \text{ [kHz]}$ , který nabývá totožných hodnot maxima  $\pm 0,006 \text{ [g]}$ . Při rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  dochází v oblasti frekvenčního  $5 \div 6,5 \text{ [kHz]}$  pásma k periodickému nárůstu amplitudy, který nabývá hodnot maxima  $\pm 0,013 \text{ [g]}$  a v oblasti frekvenčního spektra  $13 \div 14 \text{ [kHz]}$  k nárůstu amplitudy který nabývá hodnot maxima  $\pm 0,004 \text{ [g]}$ . Při nejvyšší rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 150 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ , dosahuje nárůstu amplitudy v oblasti frekvenčního spektra  $5,5 \div 7,5 \text{ [kHz]}$  hodnot maxima  $\pm 0,01 \text{ [g]}$ . Ve všech zbývajících frekvenčních pásmech při všech zkoumaných rychlost posuvu řezné hlavy hodnota nárůstu amplitudy do maxima je  $\pm 0,003 \text{ [g]}$ .



Obr. 4.32 FTT analýza sady vzorků C, pátý řez, obráběný materiál AISI 309,  $p = 350$  [MPa],  $m_a = 400$  [g·min<sup>-1</sup>],  $d_f = 1,4$  [mm],  $b = 15$  [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>],  $v = 75$  [mm·min<sup>-1</sup>],  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>] a  $v = 150$  [mm·min<sup>-1</sup>]



Obr. 4.33 FTT analýza sady vzorků C, šestý řez, obráběný materiál AISI 309,  $p = 350$  [MPa],  $m_a = 400$  [ $g \cdot min^{-1}$ ],  $d_f = 1,4$  [mm],  $b = 15$  [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora  $v = 50$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ],  $v = 75$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ],  $v = 100$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ] a  $v = 150$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ]



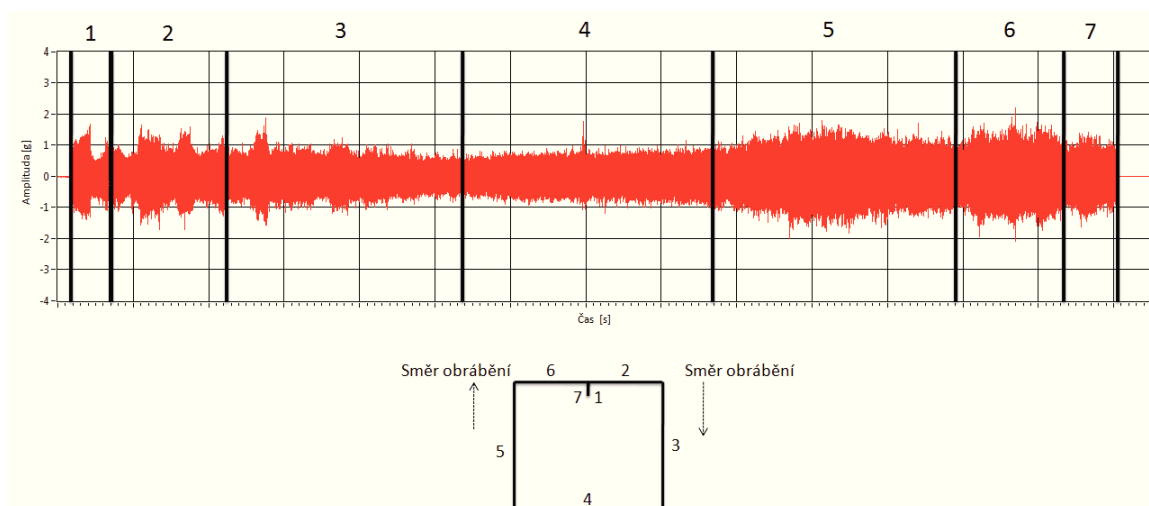
Obr. 4.34 FTT analýza sady vzorků C, sedmý řez, obráběný materiál AISI 309,  $p = 350$  [MPa],  $m_a = 400$  [ $g \cdot min^{-1}$ ],  $d_f = 1,4$  [mm],  $b = 15$  [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora  $v = 50$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ],  $v = 75$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ],  $v = 100$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ] a  $v = 150$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ]

Tab. 4.3 Analýza FFT maximální hodnoty mediánu a peak to peak frekvencí signálů akustické emise u dvou řezných rychlostí na materiálu AlSi 309

Sada	Podmínky experimentu	Sledovaná hodnota	1. úsek	2. úsek	3. úsek	4. úsek	5. úsek	6. úsek	7. úsek
C	$v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}\text{]}$ $ma = 400 \text{ [g} \cdot \text{min}^{-1}\text{]}$ $p = 350 \text{ [MPa]}$ $df = 1,4 \text{ [mm]}$ $b = 15 \text{ [mm]}$	Medián [mm]	-0,012421	0,018335	0,016510	0,017927	0,016803	0,017761	0,018220
		Peak to peak [g]	4,5834	3,93583	2,71084	3,26623	4,59057	5,3292	6,84286
C	$v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}\text{]}$ $ma = 400 \text{ [g} \cdot \text{min}^{-1}\text{]}$ $p = 350 \text{ [MPa]}$ $df = 1,4 \text{ [mm]}$ $b = 15 \text{ [mm]}$	Medián [mm]	-0,001751	0,020122	0,023593	0,020122	0,0160957	0,0182461	0,015808
		Peak to peak [g]	5,16544	3,68507	6,52329	6,35699	7,3686	5,06656	2,16388

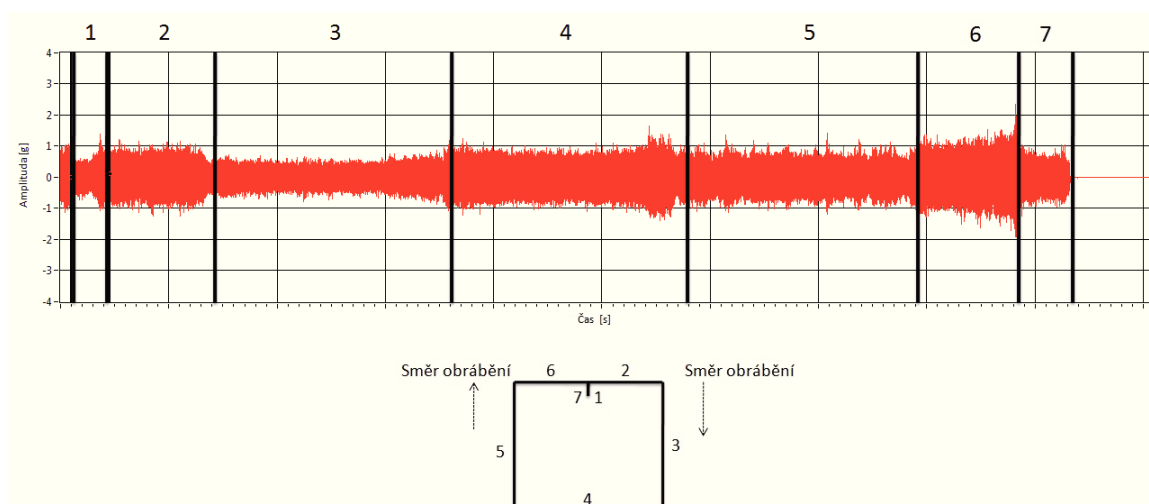
## 4.4 SADA VZORKŮ D

Sada vzorků D se bude zpracovávat obdobným způsobem jako Sada A, rozdíl je v zaostřovací trubicí která má průměr  $d_f = 1,4$  [mm] a dále v jiném nastavením hmotnostního toku abraziva a to v tomto případě  $m_a = 250$  [g·min<sup>-1</sup>]. Dále nutno dodat že se jednalo o již použitou (opotřebovanou) zaostřovací trubicí



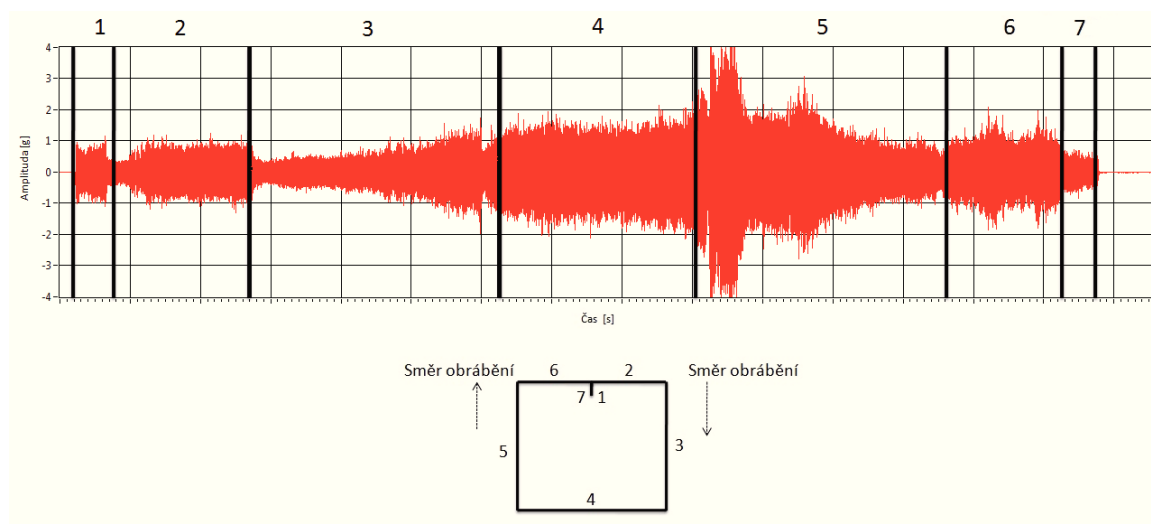
Obr. 4.35 Průběh signálu akustické emise, sada vzorků D, obráběný materiál AISI 309,  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>],  $p = 350$  [MPa],  $m_a = 250$  [g·min<sup>-1</sup>],  $d_f = 1,4$  [mm],  $b = 15$  [mm]

Průběh zobrazený na Obr. 4.35 měl následující nastavení vstupních parametrů: obráběný materiál byl AISI 309, rychlost posuvu řezné hlavy  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>], generovaný tlak byl  $p = 350$  [MPa], hmotnostní tok abraziva  $m_a = 250$  [g·min<sup>-1</sup>], materiál byl obráběn použitou (opotřebovanou) zaostřovací trubicí o průměru  $d_f = 1,4$  [mm] a tloušťka obráběného materiálu  $b = 15$  [mm]. Použité abrazivo bylo typu Barton Garnet o MESH 80.



Obr. 4.36 Průběh signálu akustické emise, sada vzorků D, obráběný materiál AISI 309,  $v = 75$  [mm·min<sup>-1</sup>],  $p = 350$  [MPa],  $m_a = 250$  [g·min<sup>-1</sup>],  $d_f = 1,4$  [mm],  $b = 15$  [mm]

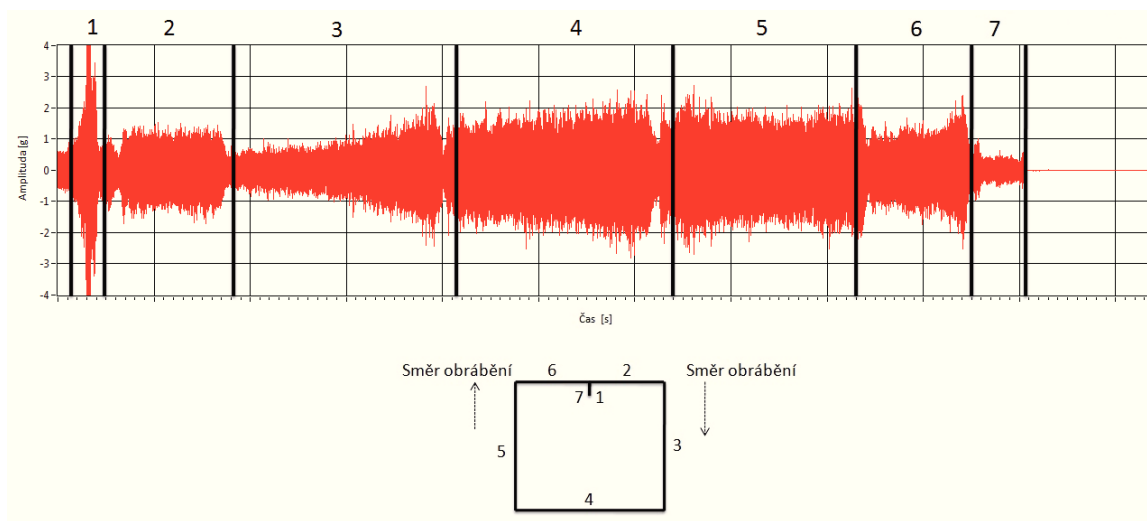
Obr. 4.36 měl následující nastavení vstupních parametrů: obráběný materiál byl AISI 309, rychlost posuvu řezné hlavy byla změněna na  $v = 75 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ , generovaný tlak byl  $p = 350 \text{ [MPa]}$ , hmotnostní tok abraziva  $m_a = 250 \text{ [g} \cdot \text{min}^{-1}]$ , materiál byl obráběn použitou (opotřebovanou) zaostřovací trubicí o průměru  $d_f = 1,4 \text{ [mm]}$  a tloušťka obráběného materiálu byla opět  $b = 15 \text{ [mm]}$ . Použité abrazivo bylo typu Barton Garnet o MESH 80.



Obr. 4.37 Průběh signálu akustické emise, sada vzorků D, obráběný materiál AISI 309,  $v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $p = 350 \text{ [MPa]}$ ,  $m_a = 250 \text{ [g} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $d_f = 1,4 \text{ [mm]}$ ,  $b = 15 \text{ [mm]}$

Na Obr. 4.37 bylo následující nastavení vstupních parametrů: obráběný materiál byl AISI 309, rychlost posuvu řezné hlavy byla změněna na  $v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ , generovaný tlak  $p = 350 \text{ [MPa]}$ , hmotnostní tok abraziva  $m_a = 250 \text{ [g} \cdot \text{min}^{-1}]$ , materiál byl obráběn použitou (opotřebovanou) zaostřovací trubicí o průměru  $d_f = 1,4 \text{ [mm]}$  a tloušťka obráběného materiálu  $b = 15 \text{ [mm]}$ . Použité abrazivo bylo typu Barton Garnet o MESH 80.





Obr. 4.38 Průběh signálu akustické emise, sada vzorků D, obráběný materiál AISI 309,  $v = 150 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $p = 350 \text{ [MPa]}$ ,  $m_a = 250 \text{ [g} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $d_f = 1,4 \text{ [mm]}$ ,  $b = 15 \text{ [mm]}$

Na posledním záznamu (Obr. 4.38) bylo následující nastavení vstupních parametrů: obráběný materiál byl AISI 309, rychlost posuvu řezné hlavy byla změněna na  $v = 150 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ , generovaný tlak byl  $p = 350 \text{ [MPa]}$ , hmotnostní tok abraziva  $m_a = 250 \text{ [g} \cdot \text{min}^{-1}]$ , materiál byl obráběn použitou (opotřebovanou) zaostřovací trubicí o průměru  $d_f = 1,4 \text{ [mm]}$  a tloušťka obráběného materiálu  $b = 15 \text{ [mm]}$ . Použité abrazivo bylo typu Barton Garnet o MESH 80.

Všeobecně lze konstatovat že v úseku 1 na výše uvedených obrázcích (Obr. 4.35, Obr. 4.36, Obr. 4.37 a Obr. 4.38) dochází k mírnému zvýšení amplitud z důvodu prvotního průniku hydroabrazivního proudu. Jedná se o jev v délce trvání cca  $2 \div 3$  sekundy, po průniku materiálem se amplituda řezu zmenšuje. Přičemž zvýšení amplitud u rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  nabývá hodnot  $\pm 1,5 \text{ [g]}$  a  $v = 75 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  dosahuje hodnot  $\pm 1,4 \text{ [g]}$ ,  $v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ , nabývá hodnot  $\pm 1,1 \text{ [g]}$ . Při zvyšování rychlosti posuvu řezné hlavy na  $v = 150 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  však dochází v tomto úseku k nestabilnímu řezu. Amplituda zde dosahuje maximálních hodnot  $\pm 4 \text{ [g]}$ .

Úsek 2 provází převážně klidové působení bez větších výkyvů amplitud při  $v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $v = 75 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  a  $v = 150 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  dosahuje maximálně hodnot  $\pm 1,5 \text{ [g]}$ .

Úsek 3, vykazuje převážně klidové působení bez větších výkyvů amplitud při  $v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $v = 150 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ , dosahujících do maximálních hodnot  $\pm 1,5 \text{ [g]}$ . Při rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 75 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  a  $v = 150 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  dochází v tomto úseku k mírnému kolísání amplitudy do maximálních hodnot  $\pm 1,3 \text{ [g]}$ .

Úsek 4, vykazuje stabilní působení. U rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 75 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  dosahují rozměrově symetrické amplitudy maximálních hodnot  $\pm 1,5 \text{ [g]}$ . U zbylých rychlostí posuvu řezné hlavy  $v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  a  $v = 150 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  dosahuje amplituda maximálních hodnot  $\pm 2,5 \text{ [g]}$ .

V úseku 5 dochází k nestabilnímu řezu u rychlostí posuvu řezné hlavy  $v = 75 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  do maximálních hodnot  $\pm 1,3 \text{ [g]}$  a při  $v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  do maximálních hodnot  $\pm 4 \text{ [g]}$ . U  $v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  a  $v = 150 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  dochází převážně ke klidovému působení bez větších výkyvů amplitud a to do maximálních hodnot  $\pm 1,7 \text{ [g]}$  u  $v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  a při zvyšující se rychlosti posuvu řezné hlavy na  $v = 150 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  do  $\pm 2,8 \text{ [g]}$ .

Úsek 6, vykazuje u Obr. 4.35, Obr. 4.36, Obr. 4.37 a Obr. 4.38 mírně kolísání amplitudy do maximálních hodnot  $\pm 2,5 \text{ [g]}$ .

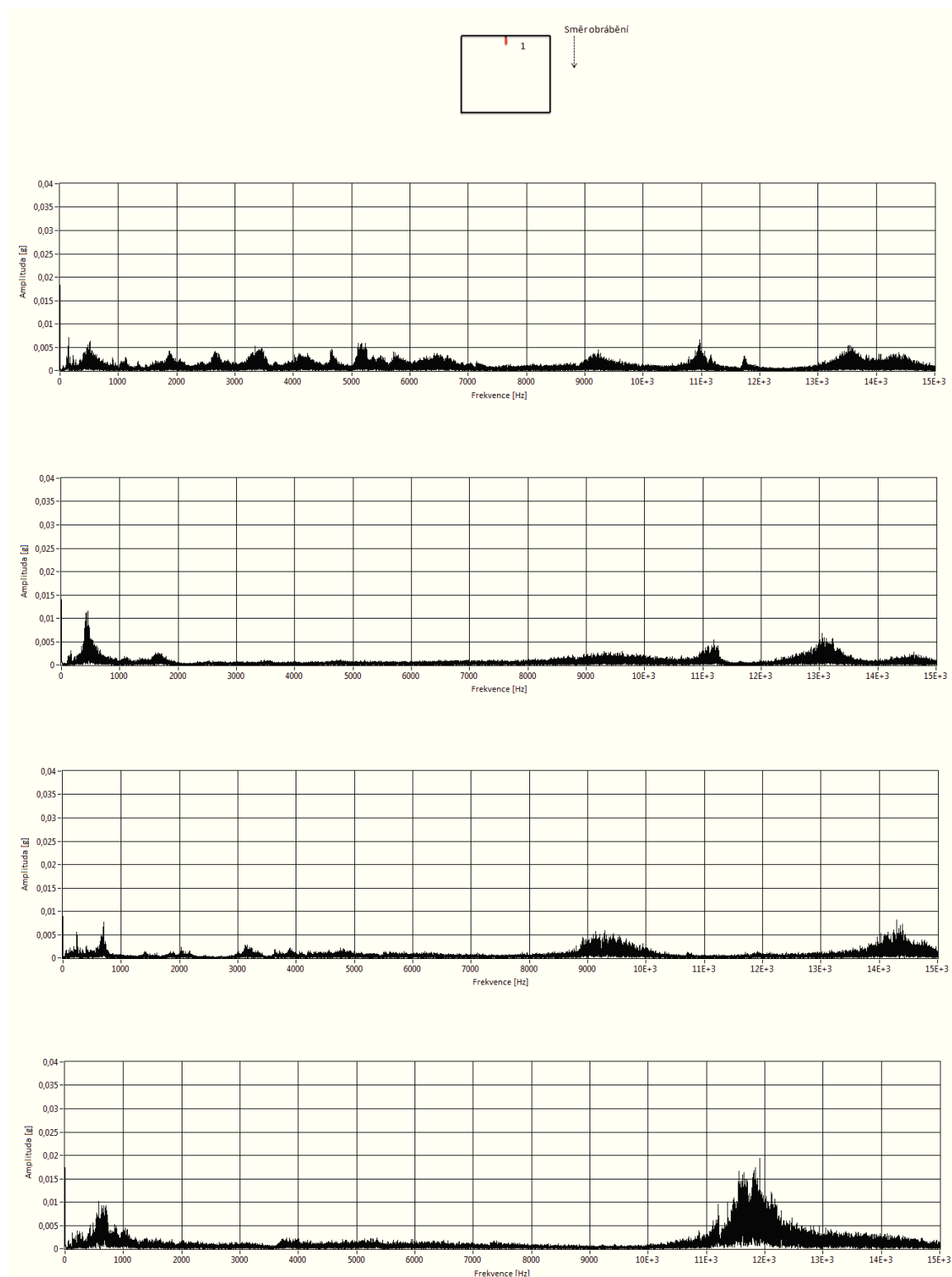
Úsek 7, vykazuje u Obr. 4.35, Obr. 4.36, Obr. 4.37 a Obr. 4.38 obdobně mírně kolísání amplitudy do maximálních hodnot  $\pm 1,5 \text{ [g]}$ .

U rychlostí posuvu řezné hlavy  $v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  a  $v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  se jeví jako nejstabilnější úsek č. 4, pouze u rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 75 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  se vykazuje jako nejstabilnější úsek č. 3.

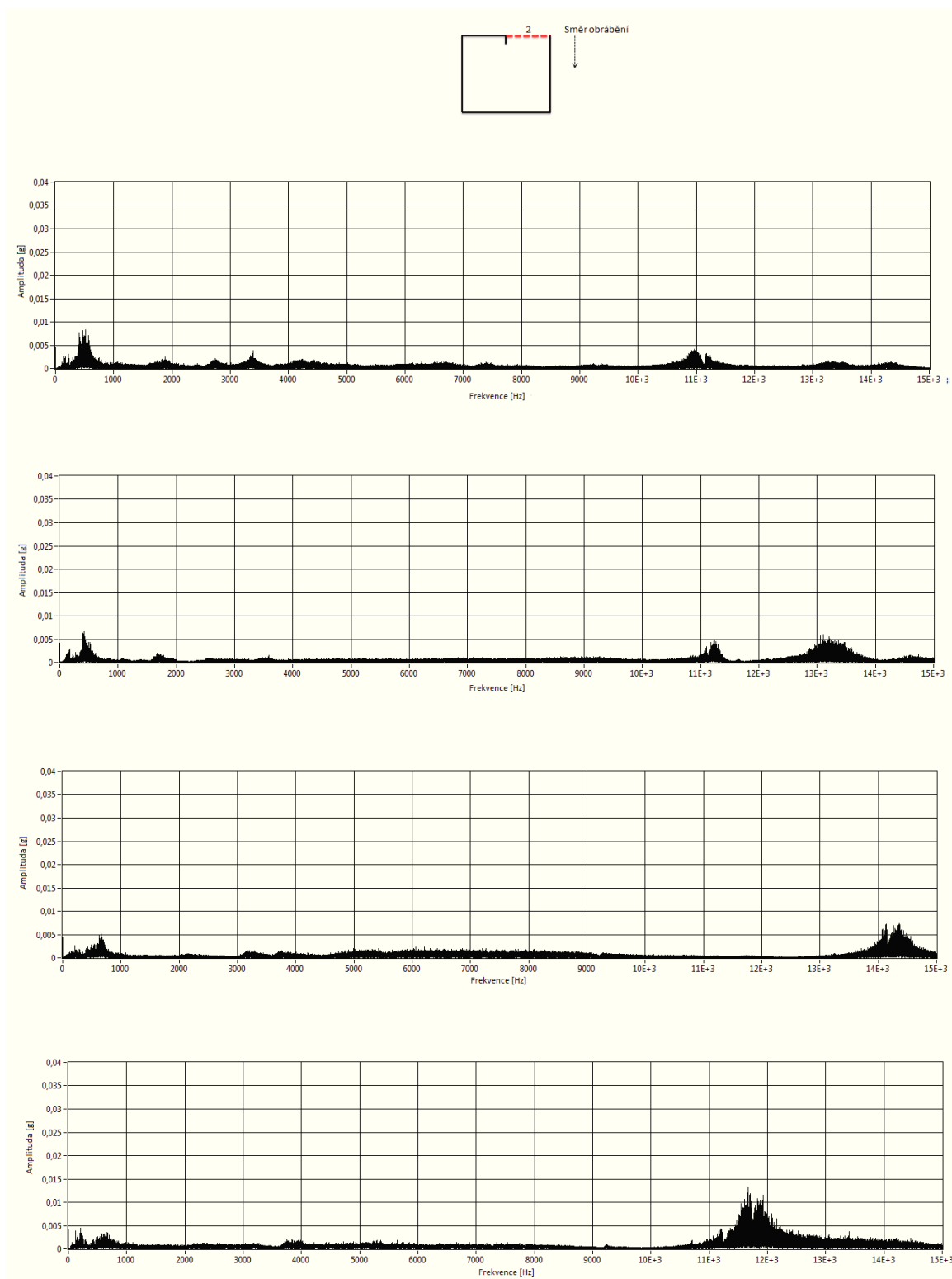
Jako nejnestabilnější úsek se projevuje u  $v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  č. 2, u  $v = 75 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  a  $v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  č. 5. U nejvyšší rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 150 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  se jeví jako nejnestabilnější úsek č. 1

#### 4.4.1 FFT Analýza vzorků D

Sada vzorků C se bude zpracovávat obdobným způsobem FFT analýzy jako Sadu A (viz. 4.1.1), rozdíl je však v zaostřovací trubici která má průměr  $d_f = 1,4 \text{ [mm]}$  a dále v jiném nastavením hmotnostního toku abraziva a to v tomto případě  $m_a = 250 \text{ [g} \cdot \text{min}^{-1}]$ . Dále nutno dodat že se jednalo o již použitou (opotřebovanou) zaostřovací trubici.



Obr. 4.39 FTT analýza sady vzorků D, první řez, obráběný materiál AISI 309,  $p = 350$  [MPa],  $m_a = 250$  [ $\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$ ],  $d_f = 1,4$  [mm],  $b = 15$  [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora  $v = 50$  [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ],  $v = 75$  [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ],  $v = 100$  [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ] a  $v = 150$  [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ]

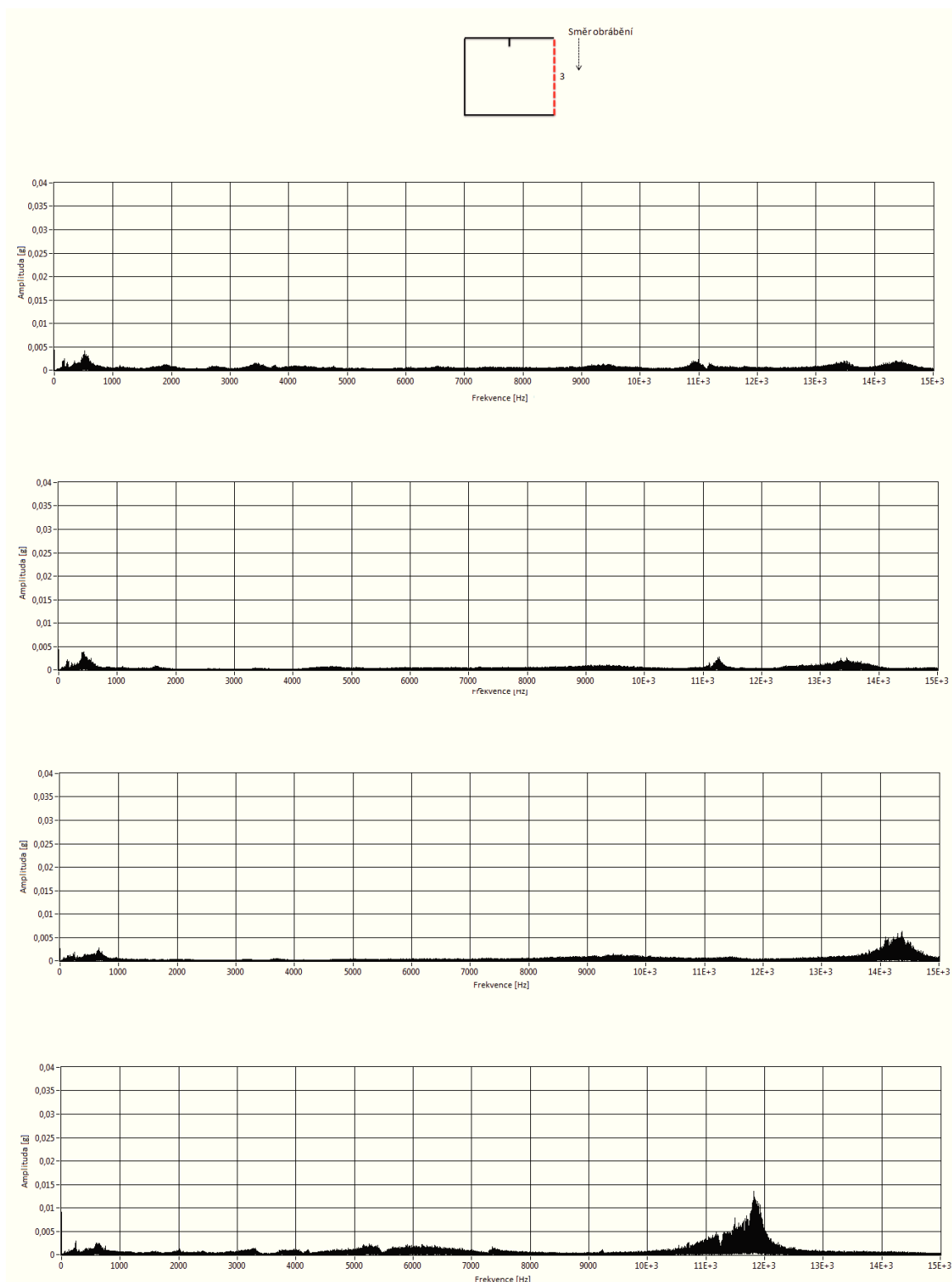


Obr. 4.40 FTT analýza sady vzorků D, druhý řez, obráběný materiál AISI 309,  $p = 350$  [MPa],  $m_a = 250$  [ $g \cdot min^{-1}$ ],  $d_f = 1,4$  [mm],  $b = 15$  [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora  $v = 50$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ],  $v = 75$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ],  $v = 100$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ] a  $v = 150$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ]

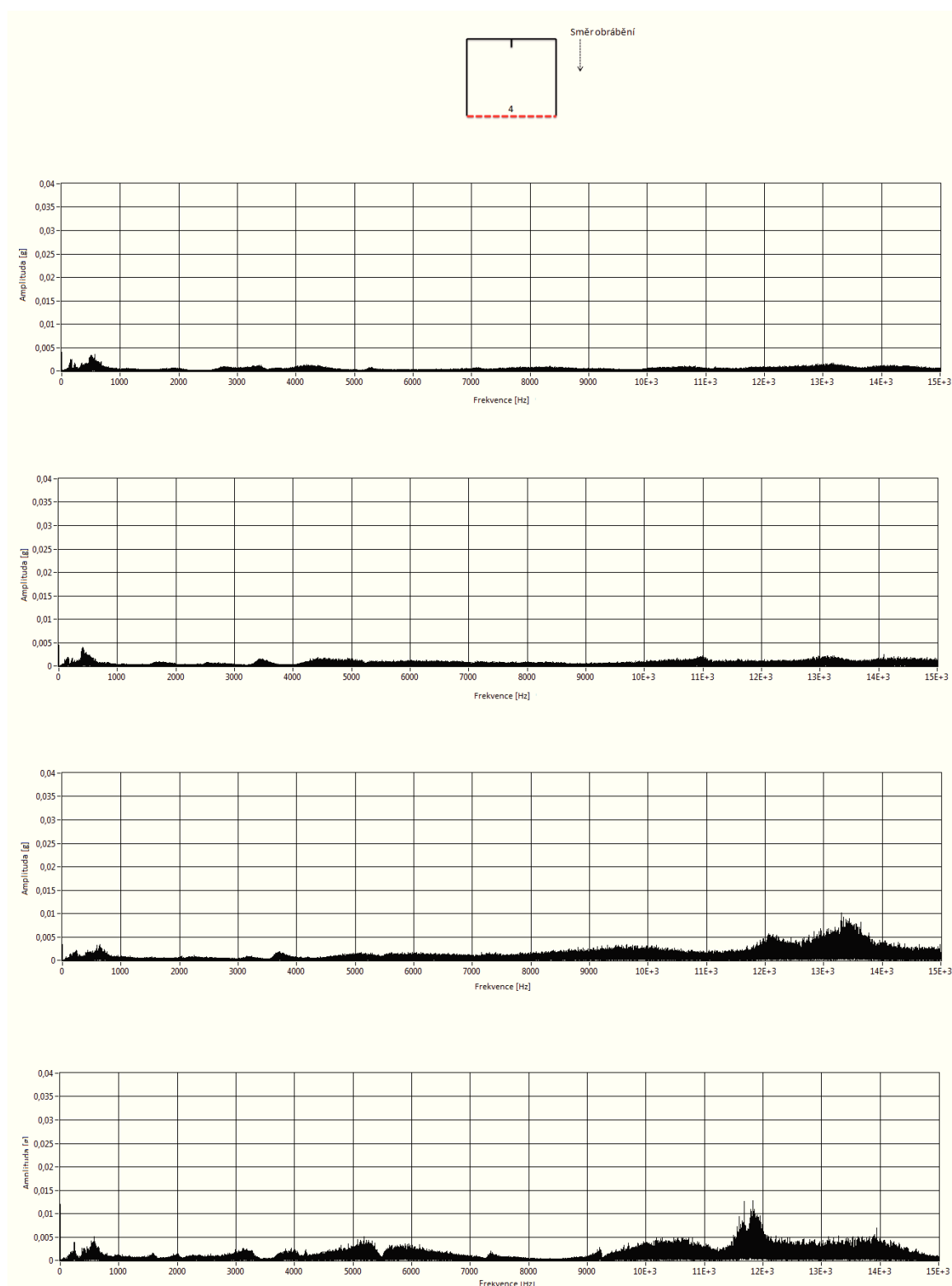
Při FFT analýze akustické emise bloku D vyobrazené na Obr. 4.39 se čtyřmi rychlostmi posuvu řezné hlavy a rozsahem frekvenčního pásma  $2 \div 15$  [kHz] zjišťujeme, že při  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>] dochází k mírnému periodickému nárůstu amplitud ve větší četnosti případů, jednak v oblasti  $2,5 \div 3$  [kHz], dále  $3 \div 4$  [kHz], následovně  $4 \div 5,5$  [kHz] a  $8,5 \div 10$  [kHz], dále  $10,5 \div 11,5$  [kHz] a na závěr v oblasti  $13 \div 15$  [kHz] kdy je hodnota maxima shodně u všech výše jmenovaných  $\pm 0,007$  [g]. U rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 75$  [mm·min<sup>-1</sup>] dochází k viditelnému nárůstu amplitudy na  $\pm 0,006$  [g] ve frekvenčním rozsahu  $10,5 \div 11,5$  [kHz] a dále ve frekvenčním spektru  $12,5 \div 14,5$  [kHz] dochází k růstu amplitudy na hodnotu  $\pm 0,006$  [g]. U další rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>] dochází k viditelnému růstu amplitudy na  $\pm 0,08$  [g] a to ve frekvenčním rozsahu polí jak  $8,5 \div 10$  [kHz], tak  $13,5 \div 15$  [kHz]. V nejvyšší rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 150$  [mm·min<sup>-1</sup>] dochází k výraznějšímu nárůstu amplitudy pouze v jedné výrazné oblasti, a to ve frekvenčním spektru  $10,5 \div 13$  [kHz], který nabývá hodnot maxima  $\pm 0,019$  [g]. Ve všech zbývajících frekvenčních pásmech při všech zkoumaných rychlost posuvu řezné hlavy hodnota nárůstu amplitudy do maxima je  $\pm 0,003$  [g].

Spektrální analýza FFT Bloku D u Obr. 4.40 je následující. U rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>] a  $v = 75$  [mm·min<sup>-1</sup>] se ve zkoumané oblasti  $2 \div 15$  [kHz] nachází pouze velmi málo viditelný nárůst amplitud a to v totožných oblastech  $10,5 \div 11,5$  [kHz], kdy je hodnota maxima u obou rychlostí shodná  $\pm 0,006$  [g]. U  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>] k viditelnému nárůstu amplitud dochází v oblasti  $13,5 \div 15$  [kHz], kdy je hodnota maxima  $\pm 0,007$  [g]. V nejvyšší rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 150$  [mm·min<sup>-1</sup>] dochází k výraznějšímu nárůstu amplitudy opětovně pouze v jediném bodě a to v oblasti frekvenčního pole  $10,5 \div 13$  [kHz], který nabývá hodnot maxima  $\pm 0,013$  [g]. Ve všech zbývajících frekvenčních pásmech při všech zkoumaných rychlost posuvu řezné hlavy hodnota nárůstu amplitudy do maxima je  $\pm 0,003$  [g].

Obr. 4.41 znázorňuje provedení spektrální analýzy FFT Bloku D. Po celém zkoumaném frekvenčním rozsahu  $7 \div 15$  [kHz] se neobjevují periodicky narůstající amplitudy, výjimkou tvoří pouze rychlost posuvu řezné hlavy  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>], kde dochází k nárůstu amplitudy v oblasti frekvenčního pásma  $12,5 \div 15$  [kHz], který nabývá hodnot maxima  $\pm 0,007$  [g] a nejvyšší rychlost posuvu řezné hlavy  $v = 150$  [mm·min<sup>-1</sup>], kde dochází k nárůstu amplitudy v oblasti frekvenčního pásma  $10,5 \div 12,5$  [kHz], který nabývá hodnot maxima  $\pm 0,014$  [g]. Ve všech zbývajících frekvenčních pásmech při všech zkoumaných rychlostech posuvu řezné hlavy, je hodnota nárůstu amplitudy do maxima  $\pm 0,003$  [g].



Obr. 4.41 FTT analýza sady vzorků D, třetí řez, obráběný materiál AISI 309,  $p = 350$  [MPa],  $m_a = 250$  [g·min<sup>-1</sup>],  $d_f = 1,4$  [mm],  $b = 15$  [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>],  $v = 75$  [mm·min<sup>-1</sup>],  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>] a  $v = 150$  [mm·min<sup>-1</sup>]



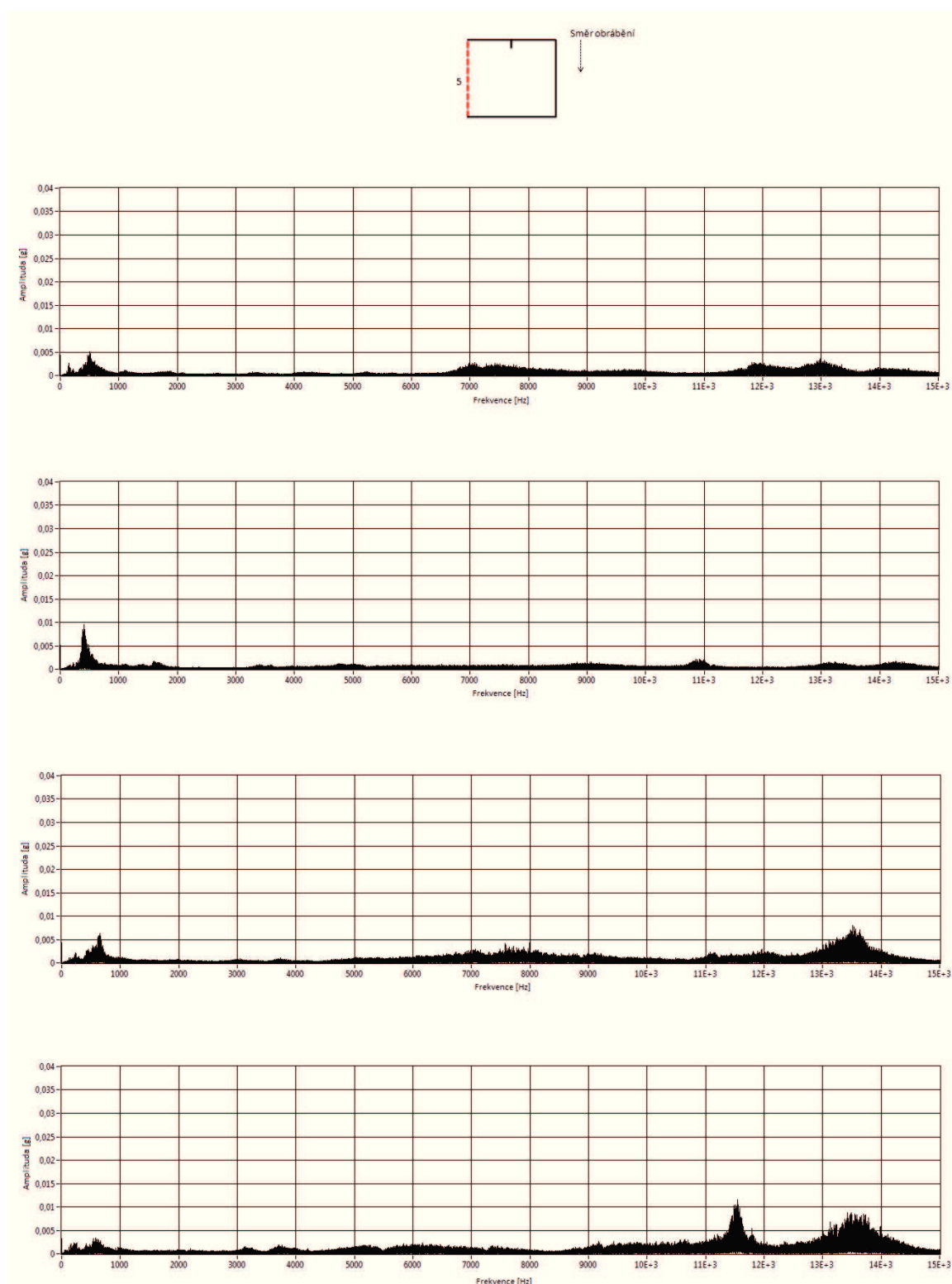
Obr. 4.42 FTT analýza sady vzorků D, čtvrtý řez, obráběný materiál AISI 309,  $p = 350$  [MPa],  $m_a = 250$  [ $\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$ ],  $d_f = 1,4$  [mm],  $b = 15$  [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora  $v = 50$  [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ],  $v = 75$  [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ],  $v = 100$  [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ] a  $v = 150$  [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ]

U Obr. 4.42, kde je prováděna spektrální analýza FFT Bloku D je situace velmi obdobná jako na Obr. 4.41. Po celém zkoumaném frekvenčním rozsahu  $7 \div 15$  [kHz] se neobjevují periodicky narůstající amplitudy, výjimkou je rychlost posuvu řezné hlavy  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>], kde dochází k nárůstu amplitudy v oblasti frekvenčního spektra  $10,5 \div 12,5$  [kHz], který nabývá hodnot maxima  $\pm 0,007$  [g] a dále oblast frekvenčního rozsahu  $13,5 \div 14,5$  [kHz], který nabývá hodnot maxima  $\pm 0,011$  [g]. Při nejvyšší rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 150$  [mm·min<sup>-1</sup>], dosahuje výraznějšího nárůstu amplitudy v oblasti frekvenčního spektra  $11,5 \div 12,5$  [kHz] hodnot maxima  $\pm 0,013$  [g]. Ve všech zbývajících frekvenčních pásmech při všech zkoumaných rychlostech posuvu řezné hlavy, je hodnota nárůstu amplitudy do maxima  $\pm 0,005$  [g].

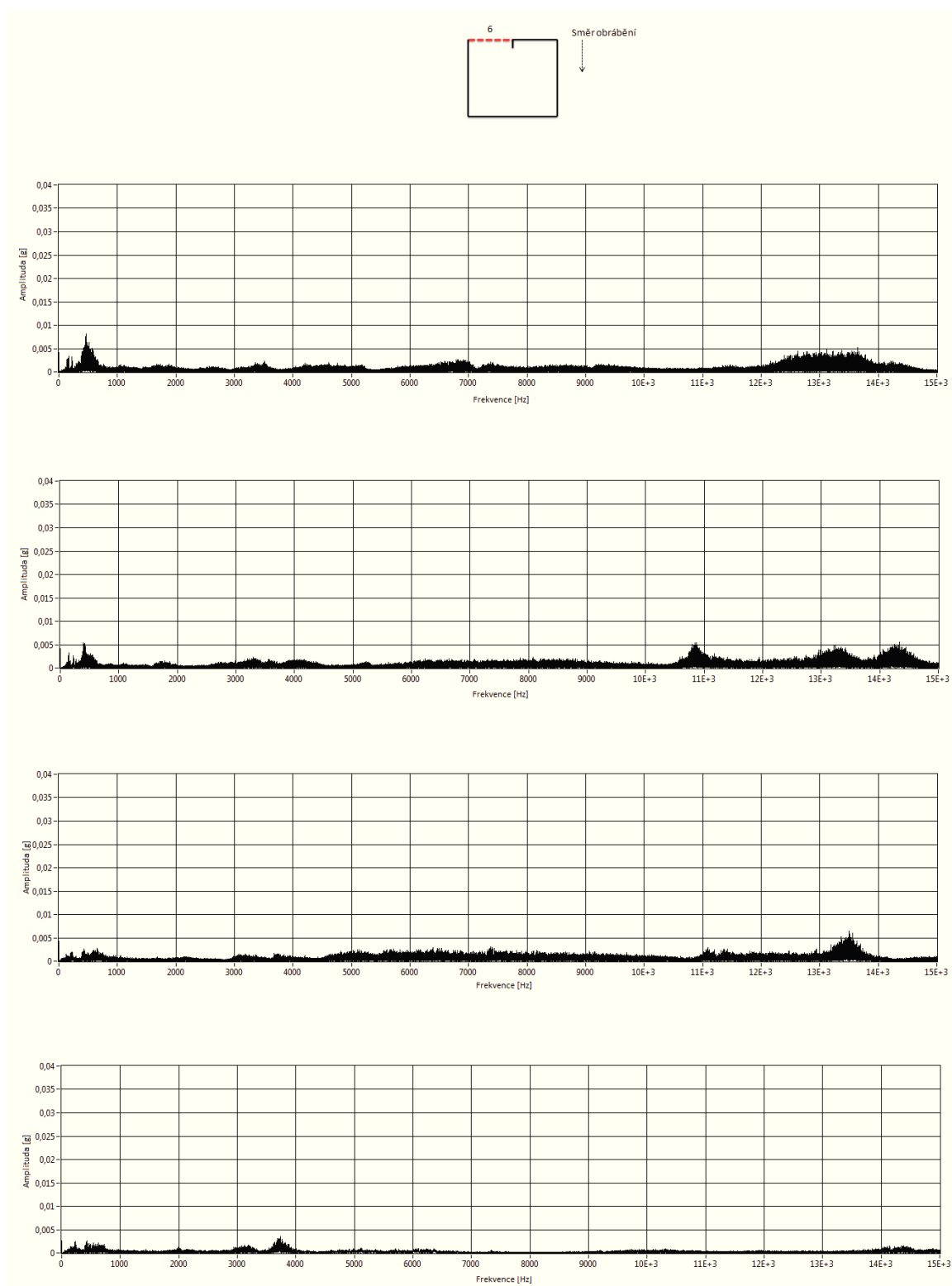
Spektrální analýza FFT Bloku D u Obr. 4.43 je následující. U rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>] se ve zkoumané oblasti  $2 \div 15$  [kHz] periodický nárůst amplitud vyskytuje pouze v oblasti  $12,5 \div 14,5$  [kHz], kdy je hodnota maxima  $\pm 0,008$  [g]. U  $v = 150$  [mm·min<sup>-1</sup>] pozorujeme periodický nárůst amplitudy o frekvenčním rozsahu  $11 \div 12$  [kHz], který nabývá hodnot  $\pm 0,012$  [g] a nakonec v oblasti  $12,5 \div 14,5$  [kHz], kdy je hodnota maxima  $\pm 0,009$  [g]. Ve všech zbývajících frekvenčních pásmech při všech zkoumaných rychlostech posuvu řezné hlavy, je hodnota nárůstu amplitudy do maxima  $\pm 0,003$  [g].

Obr. 4.44 znázorňuje realizaci spektrální analýzy FFT Bloku D. Po celém zkoumaném frekvenčním rozsahu  $7 \div 15$  [kHz] se objevují periodicky narůstající amplitudy v oblasti frekvenčního pásma  $12 \div 14$  [kHz], který nabývá hodnot maxima  $\pm 0,006$  [g] u rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>]. U další rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 75$  [mm·min<sup>-1</sup>] dochází k četnějšímu výskytu amplitud v oblasti frekvenčního spektra a to jednak  $10,5 \div 11,5$  [kHz], dále  $12,5 \div 12,5$  [kHz] a nakonec  $13,5 \div 15$  [kHz], které nabývají shodných hodnot maxima  $\pm 0,006$  [g]. Při zvýšené rychlosti posuvu řezné hlavy na  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>] dochází v oblasti frekvenčního pásma  $13 \div 14$  [kHz] k nabývání hodnot maxima na  $\pm 0,007$  [g]. Ve všech zbývajících frekvenčních pásmech při všech zkoumaných rychlostech posuvu řezné hlavy, je hodnota nárůstu amplitudy do maxima  $\pm 0,003$  [g].

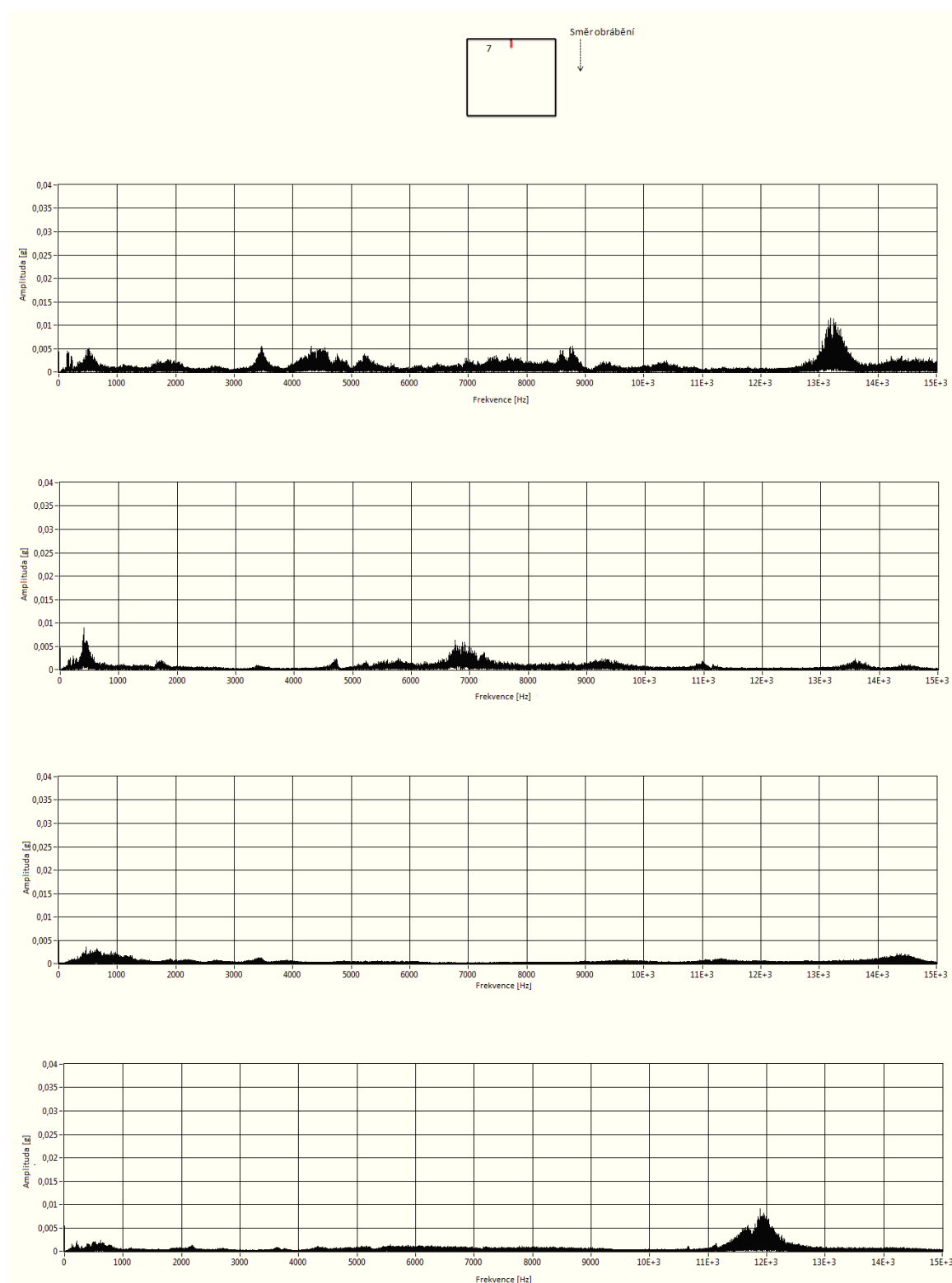




Obr. 4.43 FTT analýza sady vzorků D, pátý řez, obráběný materiál AISI 309,  $p = 350$  [MPa],  $m_a = 250$  [g·min<sup>-1</sup>],  $d_f = 1,4$  [mm],  $b = 15$  [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>],  $v = 75$  [mm·min<sup>-1</sup>],  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>] a  $v = 150$  [mm·min<sup>-1</sup>]



Obr. 4.44 FTT analýza sady vzorků D, šestý řez, obráběný materiál AISI 309,  $p = 350$  [MPa],  $m_a = 250$  [ $g \cdot min^{-1}$ ],  $d_f = 1,4$  [mm],  $b = 15$  [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora  $v = 50$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ],  $v = 75$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ],  $v = 100$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ] a  $v = 150$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ]



Obr. 4.45 FTT analýza sady vzorků D, sedmý řez, obráběný materiál AISI 309,  $p = 350 \text{ [MPa]}$ ,  $m_a = 250 \text{ [g} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $d_f = 1,4 \text{ [mm]}$ ,  $b = 15 \text{ [mm]}$  při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora  $v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $v = 75 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ ,  $v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  a  $v = 150 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$

Poslední Obr. 4.45 znázorňuje provedení spektrální analýzy FFT Bloku D. Po celém zkoumaném frekvenčním rozsahu  $7 \div 15$  [kHz] se u většiny rychlostí posuvu řezné hlavy objevují periodicky narůstající amplitudy. U  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>] v oblasti frekvenčního pásma  $3 \div 4$  [kHz], dále  $4 \div 5$  [kHz] a  $8,5 \div 9$  [kHz], které nabývají shodných hodnot maxima  $\pm 0,06$  [g]. U stejné rychlosti pak v oblasti frekvenčního pásma  $12,5 \div 14$  [kHz] dochází k nejvyšším veličinám amplitudy  $\pm 0,012$  [g]. Se zvyšující se rychlostí posuvu řezné hlavy na  $v = 75$  [mm·min<sup>-1</sup>] pozorujeme periodický nárůst amplitudy o frekvenčním rozsahu  $6,5 \div 7,5$  [kHz], který nabývá hodnot  $\pm 0,018$  [g]. Při nejvyšší rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 150$  [mm·min<sup>-1</sup>], dosahuje nárůstu amplitudy v oblasti frekvenčního spektra  $11 \div 12,5$  [kHz] hodnot maxima  $\pm 0,009$  [g]. Ve všech zbývajících frekvenčních pásmech při všech zkoumaných rychlostech posuvu řezné hlavy, je hodnota nárůstu amplitudy do maxima  $\pm 0,003$  [g].

Tab. 4.4 Analýza FFT maximální hodnoty mediánu a peak to peak frekvencí signálů akustické emise u dvou řezných rychlostí na materiálu AISI 309

Sada	Podmínky experimentu	Sledovaná hodnota	1. úsek	2. úsek	3. úsek	4. úsek	5. úsek	6. úsek	7. úsek
D	$v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ $ma = 250 \text{ [g} \cdot \text{min}^{-1}]$ $p = 350 \text{ [MPa]}$ $df = 1,4 \text{ [mm]}$ $b = 15 \text{ [mm]}$	Medián [mm]	-0,010251	0,018896	0,017837	0,018488	0,0175059	0,0182844	0,017544
		Peak to peak [g]	4,55129	4,35519	3,02396	2,95584	4,54595	4,79683	3,42287
D	$v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ $ma = 250 \text{ [g} \cdot \text{min}^{-1}]$ $p = 350 \text{ [MPa]}$ $df = 1,4 \text{ [mm]}$ $b = 15 \text{ [mm]}$	Medián [mm]	0,012656	0,010429	0,023108	0,020447	0,016701	0,01771	0,016357
		Peak to peak [g]	5,91073	3,22357	7,7127	7,06614	8,09225	5,03562	2,85161

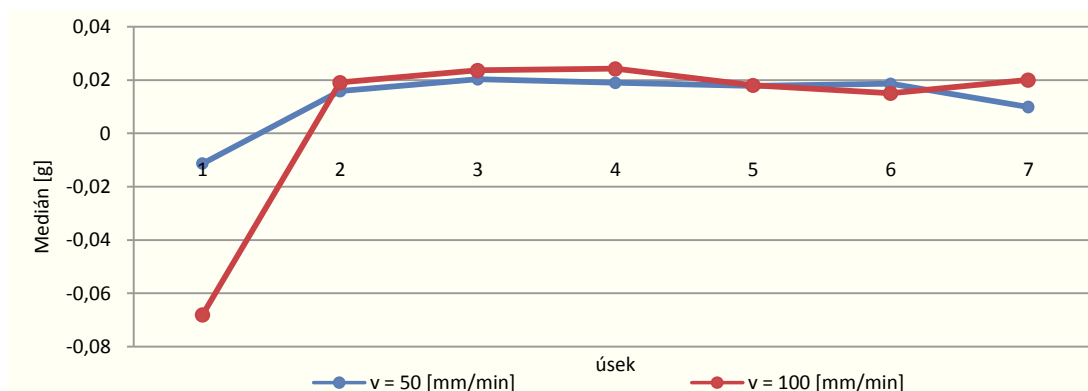
## 4.5 VÝBĚR PARAMETRŮ PROCESU

Jak bylo výše v tabulkách 4.1, 4.2, 4.3 a 4.4 uvedeno, budeme se dále zaměřovat na hodnoty mediánu. Tato práce se odkazuje na Diplomovou práci <sup>1</sup>, kde byla zpracovávána obdobným způsobem při parametrech procesu Peak to Peak a  $AE_{RMS}$ .

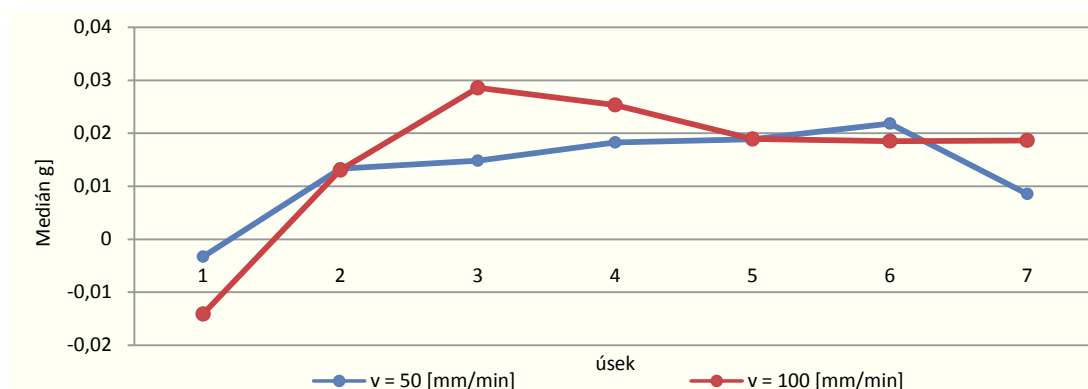
Nešli jsme jenom cestou maximálních bodů, ale středů. Odůvodnění tohoto rozhodnutí je následující. Medián byl vybrán zejména proto, že neobsahuje maximální výchylky zkoumaných amplitud, kde v Peak to Peak mohou zahrnovat i další negativní proměnné, které by nám mohli ovlivňovat průběh a potažmo výsledky experimentu. Medián byl vyhodnocen jako "zlatá střední cesta", která zjemňuje ostrost daných signálů.

Pro úplnost byl zařazen již zmiňovaný parametr Peak to Peak, což je fakticky součet maximální a minimální výchylky popsané v absolutním vyjádření. Principem tohoto faktoru je, že z kompletního sledovaného úseku získáme pouze dvě hodnoty v libovolném bodu signálu. Lze to chápat jako aproximaci signálu. Se stoupajícím rozsahem měření tyto hodnoty nejsou nepříliš přesné, lépe řečeno méně vystihují průběh sledovaného signálu.<sup>1</sup>

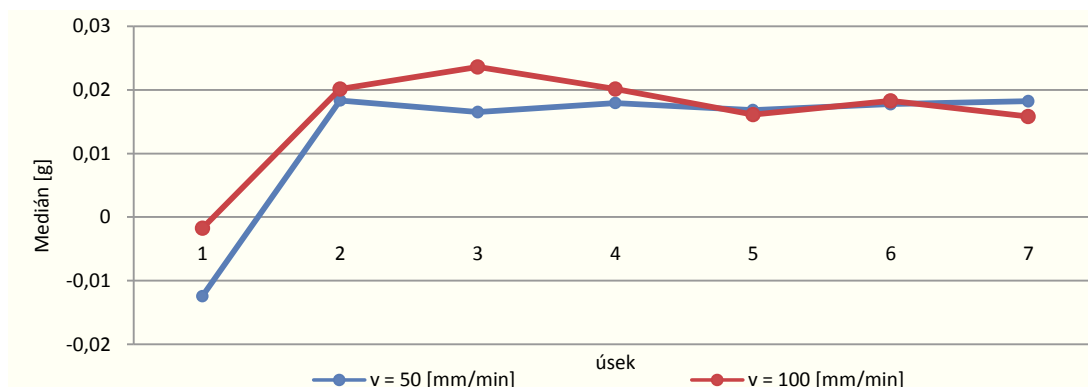
V následujících obrázcích Obr. 4.46, Obr. 4.47, Obr. 4.48, Obr. 4.49, Obr. 4.50, Obr. 4.51, Obr. 4.52 a Obr. 4.53 jsou přehledně zpracovány hodnoty z Tab. 4.1, Tab. 4.2, Tab. 4.3 a Tab. 4.4. Výsledkem je grafické znázornění hodnot jako celkový průběh po jednotlivých úsecích experimentálních řezů. Použité abrazivo bylo typu Barton Garnet o MESH 80.



Obr. 4.46 Průběh hodnot mediánu vycházející z Tab. 9.1 obráběný materiál AISI 309, sada A, kde  $p = 350$  [MPa],  $m_a = 400$  [g·min<sup>-1</sup>],  $d_f = 0,8$  [mm],  $b = 15$  [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>] a  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>]



Obr. 4.47 Průběh hodnot mediánu vycházející z Tab. 9.2 obráběný materiál AISI 309, sada B, kde  $p = 350$  [MPa],  $m_a = 250$  [g·min<sup>-1</sup>],  $d_f = 0,8$  [mm],  $b = 15$  [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>] a  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>]



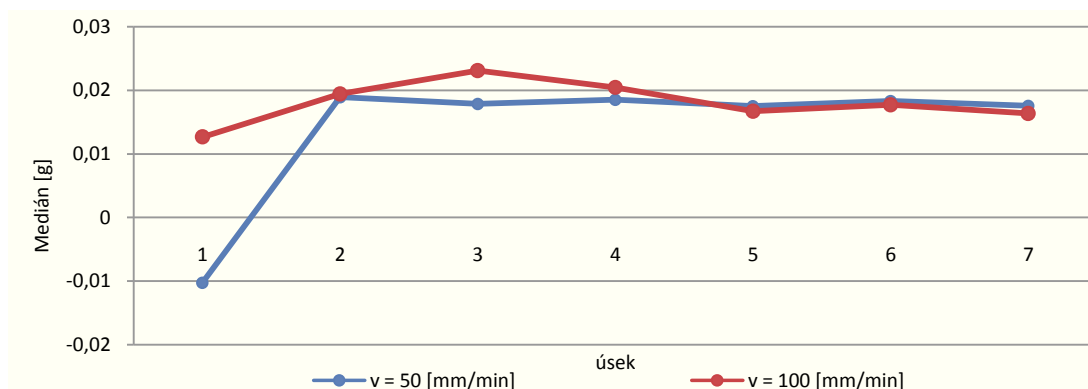
Obr. 4.48 Průběh hodnot mediánu vycházející z Tab. 9.3 obráběný materiál AISI 309, sada C, kde  $p = 350$  [MPa],  $m_a = 400$  [g·min<sup>-1</sup>],  $d_f = 1,4$  [mm],  $b = 15$  [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>] a  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>]

Na Obr. 4.46 je znázorněn průběh hodnot mediánu v závislosti na čase s vyznačenými úseky při rychlostech posuvu řezné hlavy  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>] a  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>]. Obráběn byl materiál AISI 309 sady A. Další technologické parametry byli následující: generovaný tlak byl  $p = 350$  [MPa], hmotnostní tok abraziva  $m_a = 400$  [g·min<sup>-1</sup>], materiál byl obráběn novou (neopotřebovanou) zaostřovací trubicí o průměru  $d_f = 0,8$  [mm] a tloušťka obráběného materiálu  $b = 15$  [mm]. Použité abrazivo bylo typu Barton Garnet o MESH 80. Hodnoty mediánu mají od úseku 1 stoupající charakter a maximální dosahované amplitudy byly na úseku 4 o hodnotě 0,024 [g], dále po zbytek procesu dělení materiálu docházelo k velmi pozvolnému poklesu.

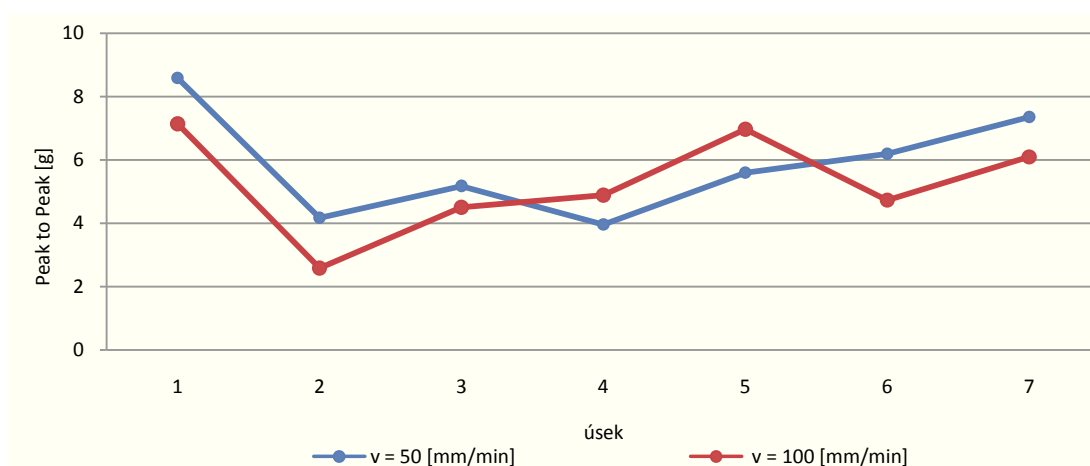
Na následujícím Obr. 4.47 je ilustrován průběh hodnot mediánu v závislosti na čase s vyznačenými úseky při rychlostech posuvu řezné hlavy  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>] a  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>]. Obráběn byl materiál AISI 309 sady B. Hodnoty mediánu mají od úseku 1 stoupající charakter a to zvláště při rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>]. Maximální dosahované amplitudy byly zaznamenány na úseku 3 o hodnotě 0,029 [g], dále po zbytek procesu dělení materiálu docházelo k pozvolnému poklesu u  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>]. Při  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>] však dochází k dalšímu stoupání až do bodu 6, kdy dochází k poklesu amplitudy. Technologické parametry byly následující: hmotnostní tok abraziva byl změněn na  $m_a = 250$  [g·min<sup>-1</sup>], použité abrazivo bylo typu Barton Garnet o MESH 80, generovaný tlak byl  $p = 350$  [MPa], tloušťka obráběného materiálu  $b = 15$  [mm] a materiál byl obráběn novou (neopotřebovanou) zaostřovací trubicí o průměru  $d_f = 0,8$  [mm].

U Obr. 4.48 je graficky popsán průběh hodnot mediánu v závislosti na čase s vyznačenými úseky při rychlostech posuvu řezné hlavy  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>] a  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>]. Obráběn byl materiál AISI 309 sady C. Další technologické parametry byli následující: generovaný tlak byl  $p = 350$  [MPa], hmotnostní tok abraziva  $m_a = 400$  [g·min<sup>-1</sup>], materiál byl obráběn použitou (opotřebovanou) zaostřovací trubicí o průměru  $d_f = 1,4$  [mm], použité abrazivo bylo typu Barton Garnet o MESH 80 a tloušťka obráběného materiálu  $b = 15$  [mm]. Hodnoty mediánu mají opětovně od úseku 1 stoupající charakter, maximální dosahované výchylky byly opětovně zaznamenány na úseku 3 o hodnotě 0,024 [g], dále po zbytek procesu dělení materiálu docházelo k pozvolnému poklesu u  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>]. Při  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>] dochází spíše k ustálení amplitudy od dobu 2 do konce řezu.

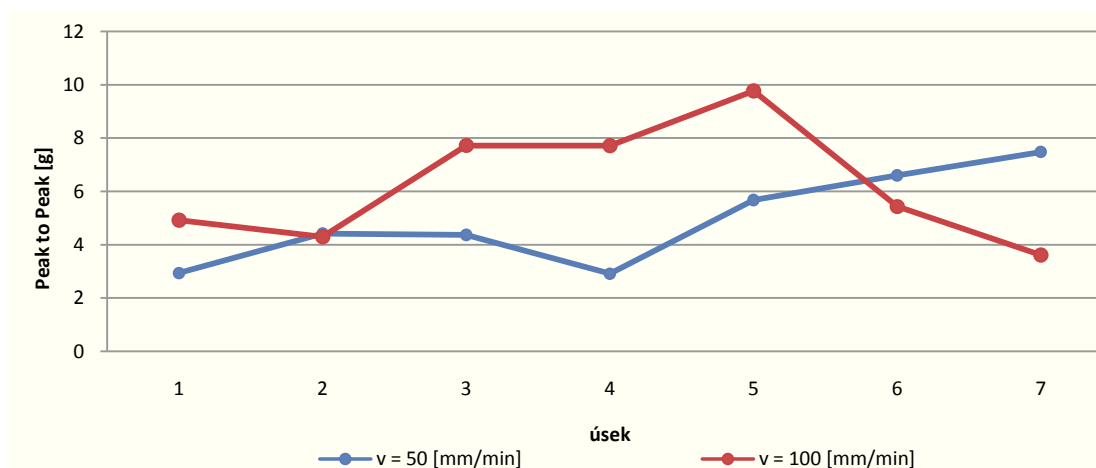




Obr. 4.49 Průběh hodnot mediánu vycházející z Tab. 9.4 obráběný materiál AISI 309, sada D, kde  $p = 350$  [MPa],  $m_a = 250$  [ $g \cdot min^{-1}$ ],  $d_f = 1,4$  [mm],  $b = 15$  [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy  $v = 50$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ] a  $v = 100$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ]



Obr. 4.50 Průběh hodnot Peak to Peak vycházející z Tab. 9.1 obráběný materiál AISI 309, sada A, kde  $p = 350$  [MPa],  $m_a = 400$  [ $g \cdot min^{-1}$ ],  $d_f = 0,8$  [mm],  $b = 15$  [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy  $v = 50$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ] a  $v = 100$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ]



Obr. 4.51 Průběh hodnot Peak to Peak vycházející z Tab. 9.2 obráběný materiál AISI 309, sada A, kde  $p = 350$  [MPa],  $m_a = 250$  [ $g \cdot min^{-1}$ ],  $d_f = 0,8$  [mm],  $b = 15$  [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy  $v = 50$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ] a  $v = 100$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ]

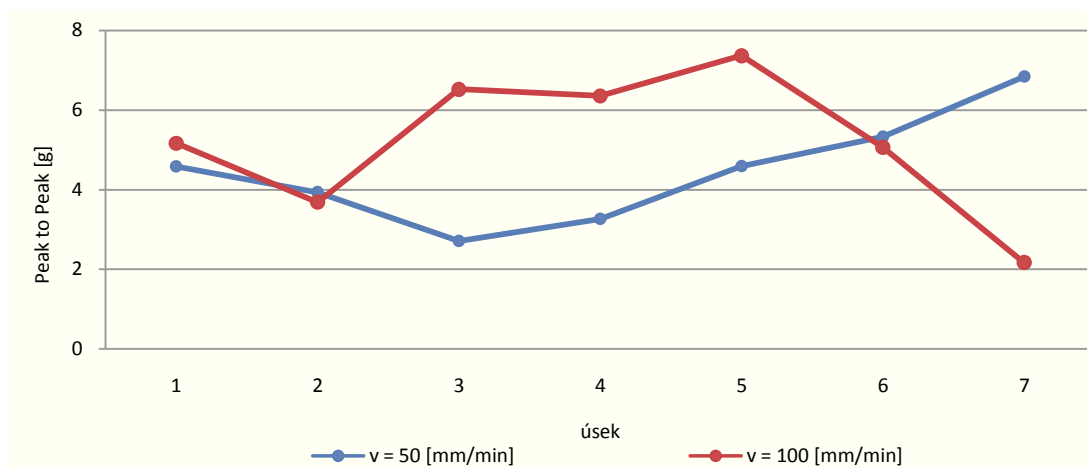
U dalšího Obr. 4.49 je znázornění průběhu hodnot mediánu v závislosti na čase s vyznačenými úseky při rychlostech posuvu řezné hlavy  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>] a  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>]. Obráběn byl materiál AISI 309 sady D. Další technologické parametry byli následující: použité abrazivo bylo typu Barton Garnet o MESH 80, generovaný tlak byl  $p = 350$  [MPa], hmotnostní tok abraziva byl změněn na  $m_a = 250$  [g·min<sup>-1</sup>], materiál byl obráběn použitou (opotřebovanou) zaostřovací trubicí o průměru  $d_f = 1,4$  [mm] a tloušťka obráběného materiálu  $b = 15$  [mm]. Hodnoty mediánu mají opětovně od úseku 1 stoupající charakter, maximální dosahované výchylky byly opětovně zaznamenány na úseku 5 o hodnotě 0,023 [g], dále po zbytek procesu dělení materiálu docházelo k velmi pozvolnému poklesu.

V Obr. 4.50 je znázorněn průběh hodnot Peak to Peak v závislosti na čase s vyznačenými úseky při rychlostech posuvu řezné hlavy  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>] a  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>]. Hodnoty Peak to Peak mají od úseku 1 shodně klesající charakter do řezu 2. Posléze dochází ke stoupání až do řezu sedm, přičemž maximální dosahované výchylky byly zaznamenány právě na prvním úseku a to o hodnotě 8,58 [g] při  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>]. Obráběn byl materiál AISI 309 sady A. Další technologické parametry byli následující: generovaný tlak byl  $p = 350$  [MPa], hmotnostní tok abraziva  $m_a = 400$  [g·min<sup>-1</sup>], materiál byl obráběn novou (neopotřebovanou) zaostřovací trubicí o průměru  $d_f = 0,8$  [mm] a tloušťka obráběného materiálu  $b = 15$  [mm]. Použité abrazivo bylo typu Barton Garnet o MESH 80.

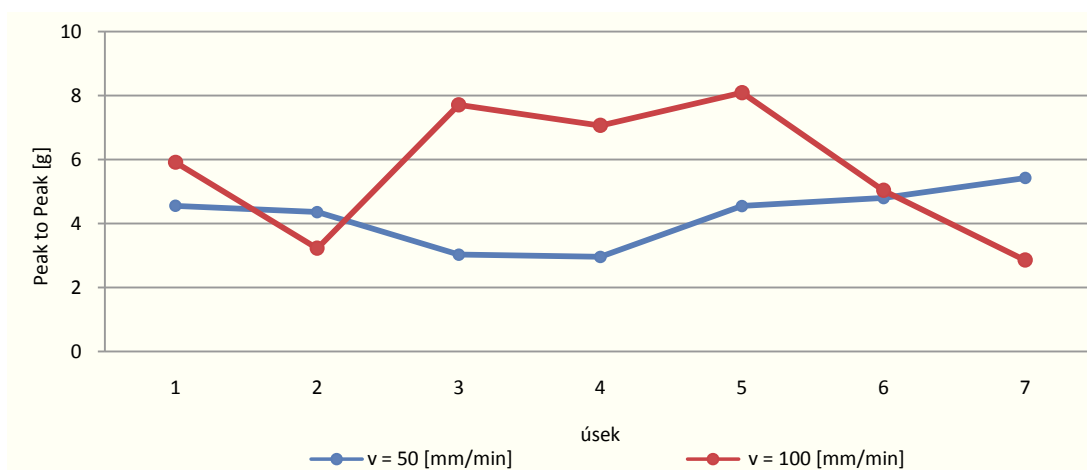
Na následujícím Obr. 4.51 je ilustrován průběh hodnot Peak to Peak v závislosti na čase s vyznačenými úseky při rychlostech posuvu řezné hlavy  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>] a  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>]. Obráběn byl materiál AISI 309 sady B. Další technologické parametry byli následující: hmotnostní tok abraziva byl změněn na  $m_a = 250$  [g·min<sup>-1</sup>], použité abrazivo bylo typu Barton Garnet o MESH 80, generovaný tlak byl  $p = 350$  [MPa], tloušťka obráběného materiálu  $b = 15$  [mm] a materiál byl obráběn novou (neopotřebovanou) zaostřovací trubicí o průměru  $d_f = 0,8$  [mm]. Hodnoty Peak to Peak mají pro každou rychlost posuvu řezné hlavy jiný vývojový charakter. Od úseku 1 při rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>] dochází k pozvolnému stoupání po celém zkoumaném rozsahu, výjimkou je řez čtyři, kdy dochází k výraznému poklesu amplitudy. U další rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>] lze rozdělit průběh na tři oblasti. V první dochází k poklesu amplitudy z řezu jedna na řez dva, následující oblast charakterizuje stoupající proces až do řezu 5, kdy dosahuje amplituda maxima o hodnotě 9,77 [g]. Poslední část je klesajícího charakteru až do posledního řezu.

U Obr. 4.52 je graficky popsán průběh hodnot Peak to Peak v závislosti na čase s vyznačenými úseky při rychlostech posuvu řezné hlavy  $v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  a  $v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ . Obráběn byl materiál AISI 309 sady C. Hodnoty Peak to Peak mají velmi podobný charakter jako u Obr. 4.51. Rozdíl je však u rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ , kdy dochází od prvního řezu ke klesání až do řezu 3, dále je již charakter vývoje hodnot obdobný jako u již výše zmiňovaného Obr. 4.51. Maximální amplituda byla opětovně zaznamenána u rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ , v řezu 5, kdy amplituda maxima dosahuje hodnoty 7,36 [g]. Technologické parametry byly následující: generovaný tlak byl  $p = 350 \text{ [MPa]}$ , hmotnostní tok abraziva  $m_a = 400 \text{ [g} \cdot \text{min}^{-1}]$ , materiál byl obráběn použitou (opotřebovanou) zaostřovací trubicí o průměru  $d_f = 1,4 \text{ [mm]}$ , použité abrazivo bylo typu Barton Garnet o MESH 80 a tloušťka obráběného materiálu  $b = 15 \text{ [mm]}$ .

U posledního Obr. 4.53 je znázornění průběhu hodnot Peak to Peak v závislosti na čase s vyznačenými úseky při rychlostech posuvu řezné hlavy  $v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  a  $v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ . Obráběn byl materiál AISI 309 sady D. Další technologické parametry byly následující: použité abrazivo bylo typu Barton Garnet o MESH 80, generovaný tlak byl  $p = 350 \text{ [MPa]}$ , hmotnostní tok abraziva byl změněn na  $m_a = 250 \text{ [g} \cdot \text{min}^{-1}]$ , materiál byl obráběn použitou (opotřebovanou) zaostřovací trubicí o průměru  $d_f = 1,4 \text{ [mm]}$  a tloušťka obráběného materiálu  $b = 15 \text{ [mm]}$ . Hodnoty Peak to Peak mají de-facto podobný charakter jako u Obr. 4.52. Maximální amplituda byla opětovně zaznamenána u rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ , v řezu 5, kdy amplituda maxima dosahuje hodnoty 8,09 [g].



Obr. 4.52 Průběh hodnot Peak to Peak vycházející z Tab. 9.3 obráběný materiál AISI 309, sada A, kde  $p = 350$  [MPa],  $m_a = 400$  [g·min<sup>-1</sup>],  $d_f = 1,4$  [mm],  $b = 15$  [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>] a  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>]



Obr. 4.53 Průběh hodnot Peak to Peak vycházející z Tab. 9.4 obráběný materiál AISI 309, sada A, kde  $p = 350$  [MPa],  $m_a = 250$  [g·min<sup>-1</sup>],  $d_f = 1,4$  [mm],  $b = 15$  [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>] a  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>]

Shrnutí hodnocení závislostí mediánu a hodnot Peak to Peak je následující:

Maximálních amplitud u mediánu bylo dosaženo na úseku č. 3. Výjimku tvoří Obr. 4.49, kdy maximum bylo dosaženo na úseku č. 4. Pokud se však podíváme pozorněji na daná data, tak zjistíme že na úseku č. 3 se nachází téměř totožný bod, respektive o bezmála stejné hodnotě jak na úseku č. 4. Proto lze konstatovat, že maximálních amplitud mediánu v průběhu celého procesu dělení bylo při již zmiňovaných technologických parametrech dosaženo na úseku č. 3.

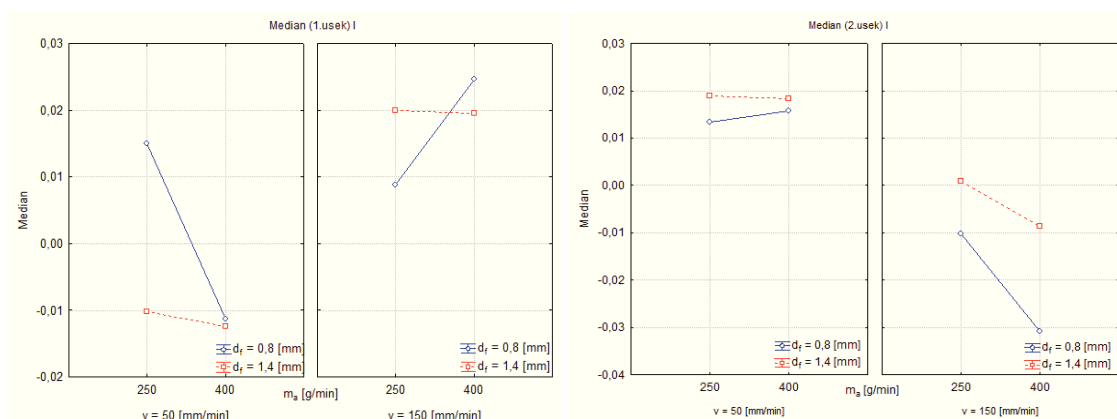
U průběhu hodnot mediánu se amplitudy výrazně zvyšovaly z počátečního úseku do úseku č. 2. Následně se proces stoupání zmírnil a maxima dosáhl v úseku č. 3. Následoval velmi pozvolný pokles až do posledního úseku.

K nejvyšším hodnotám Peak to Peak jsme dospěli v úseku č. 5. Výjimkou byla sada A, kdy výrazným způsobem byla tato událost ovlivněna prvotním průnikem hydroabrazivního proudu.

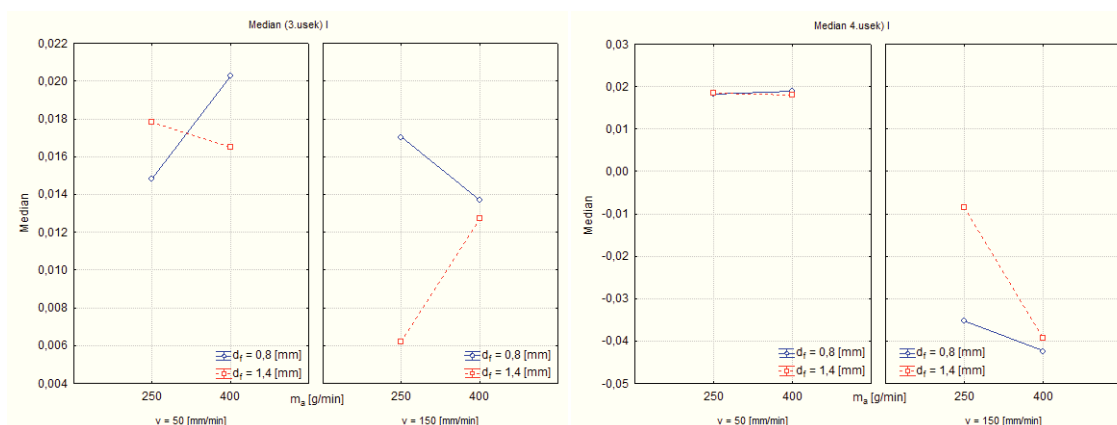
Průběh hodnot Peak to Peak byl u každé z rychlostí posuvu řezné hlavy odlišný. Při  $v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  v prvotní fázi dochází k poklesu hodnot amplitud a od úseku č. 3 ÷ 4 ke zvyšování až do konečného úseku. U  $v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  můžeme proces definovat do tří částí. První je klesající od počátku do úseku č. 2 následuje vzestup až do úseku č. 5. Třetí a potažmo poslední úsek je klesajícího charakteru. S kombinací průměrů zaostřovacích trubic  $d_f$  a hmotnostním tokem abraziva  $m_a$  nedochází k zásadnímu ovlivnění výsledných hodnot. Sleduje že na celkový průběh hodnot Peak to Peak působí jako hlavním ovlivňujícím faktorem rychlost posuvu řezné hlavy.

## 4.6 VÝZNAMNOST FAKTORŮ OVLIVŇUJÍCÍCH MĚŘENOU HODNOTU

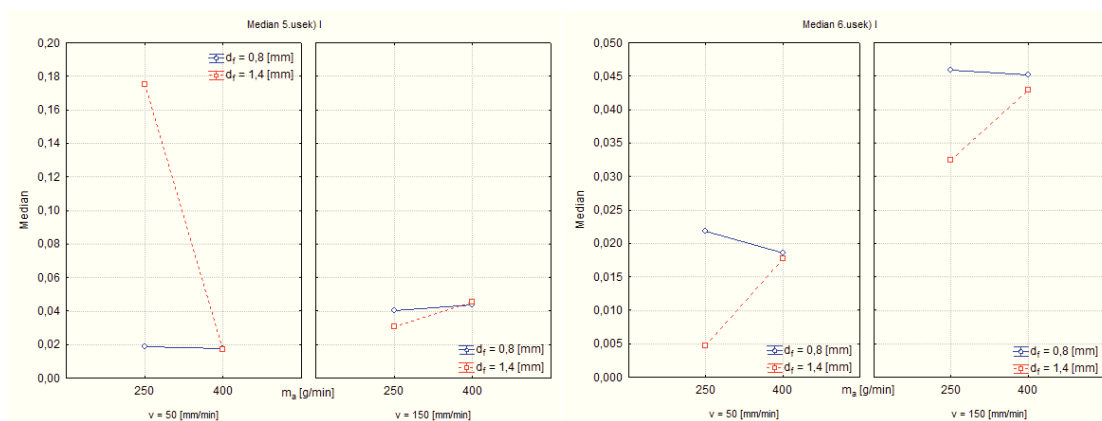
V této kapitole se budeme zabývat vlivem hmotnostního toku abraziva  $m_a$ , průměrů zaostřovacích trubic  $d_f$ , a rychlostí posuvu řezné hlavy na parametr mediánu při jednotlivých úsecích. Použité abrazivo bylo typu Barton Garnet o MESH 80.



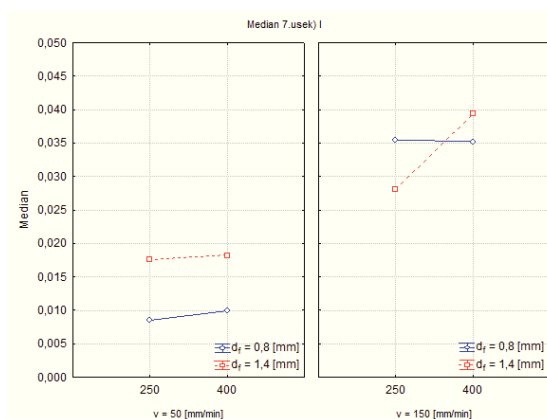
Obr. 4.54 Vliv průměrů zaostřovacích trubic, hmotnostního toku abraziva a rychlosti posuvu na parametr mediánu úseku 1 a 2. Obráběný materiál AISI 309, kde  $p = 350$  [MPa] a  $b = 15$  [mm]



Obr. 4.55 Vliv průměrů zaostřovacích trubic, hmotnostního toku abraziva a rychlosti posuvu na parametr mediánu úseku 3 a 4. Obráběný materiál AISI 309, kde  $p = 350$  [MPa] a  $b = 15$  [mm]



Obr. 4.56 Vliv průměrů zaostřovacích trubic, hmotnostního toku abraziva a rychlosti posuvu na parametr mediánu úseku 5 a 6. Obráběný materiál AISI 309, kde  $p = 350$  [MPa] a  $b = 15$  [mm]



Obr. 4.57 Vliv průměrů zaostřovacích trubic, hmotnostního toku abraziva a rychlosti posuvu na parametr mediánu úseku 7. Obráběný materiál AISI 309, kde  $p = 350$  [MPa] a  $b = 15$  [mm]

Predikce měření byla následující:

Z námi zjištěných dat které jsou kombinací různých faktorů mělo vyplynout jaká je míra významnosti právě těchto faktorů na námi sledovaném parametru mediánu.

Shrnutí zjištěných dat je následující:

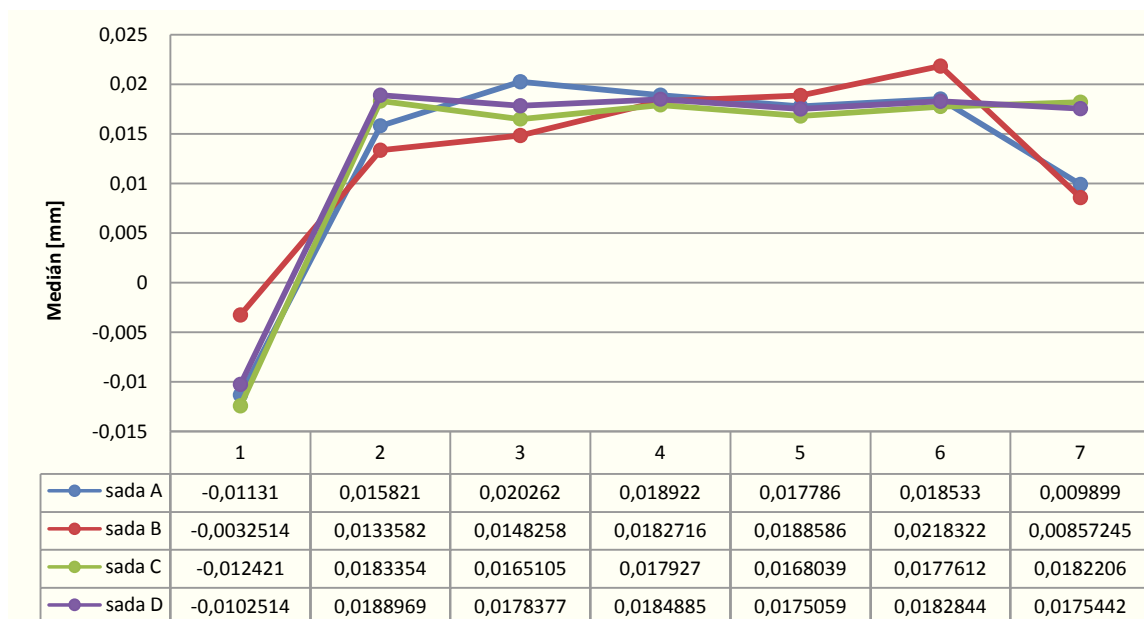
Lze konstatovat, že nebylo prokázáno z výše uvedených dat, že by byla výrazná spojitost mezi hmotnostním tokem abraziva, průměry zaostřovacích trubic či rychlostmi posuvu řezné hlavice a námi sledovaným parametrem mediánem. Zdůvodnění tohoto tvrzení vyplývá z faktu, že výsledná hodnota významnosti u každého ze sledovaných hodnot nepřesáhla 50%. Pro následnou úspěšnou aplikaci výsledků experimentu musí být hodnota výrazně vyšší, což nebylo u tohoto měření dosaženo.<sup>73</sup>

## 5. NÁVRH NA VYUŽITÍ VÝSLEDKŮ

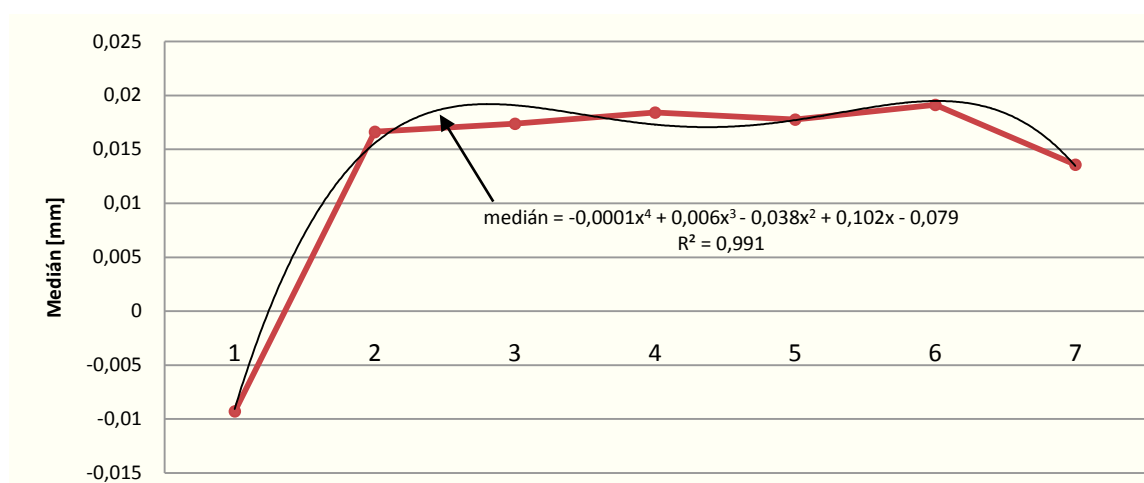
V následujících obrázcích Obr. 5.1, Obr. 5.3, Obr. 5.5 a Obr. 5.7, jsou zobrazeny grafické průběhy hodnot  $AE_M$  či  $AE_{PTP}$ . Zkoumány jsou rychlosti posuvů řezné hlavy  $v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  a  $v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  na jednotlivých úsecích. Použité abrazivo bylo typu Barton Garnet o MESH 80. Technologické parametry jsou uvedeny v Tab. 4.1, Tab. 4.2, Tab. 4.3 a Tab. 4.4. Výstupem je sumarizace dat do jediné datové řady, ze které získáváme polynomicou regresi 4. řádu. (Jedná se o 4 sumarizované celky = 4 rovnice)

Koeficient spolehlivosti  $R$  je indikátor udávající, jak přesně odpovídají předpokládané hodnoty spojnice trendů skutečným datům. Spojnice trendu je nejspolehlivější v případě, že se hodnota spolehlivosti blíží nebo rovná hodnotě 1. Pro námi prováděný experiment byla hodnota minimální spolehlivosti stanovena na 90 % respektive na  $R \geq 0,90$ .

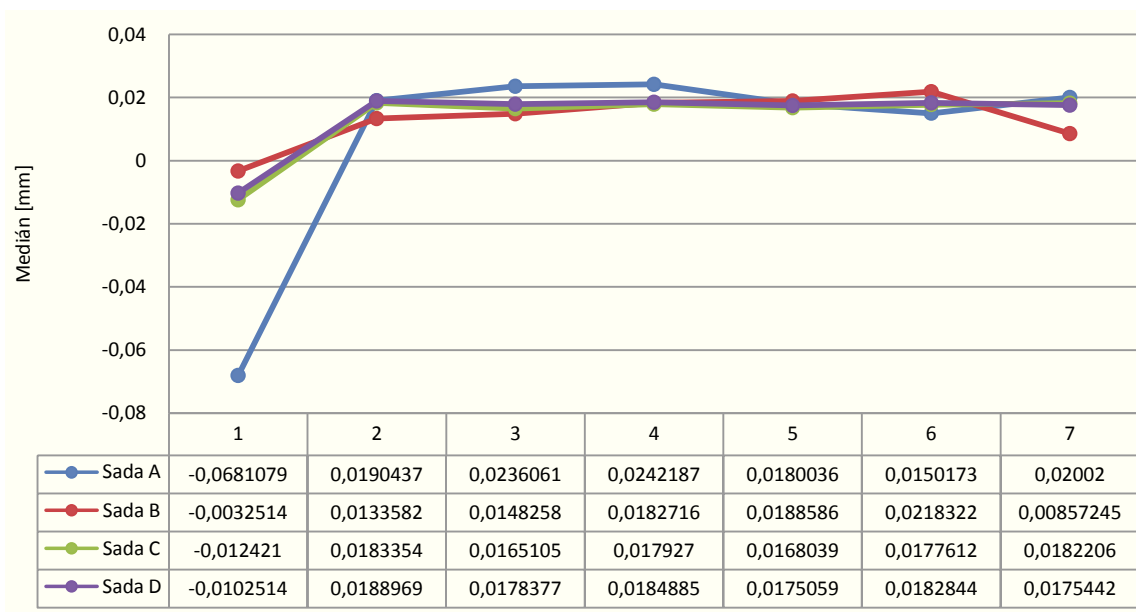




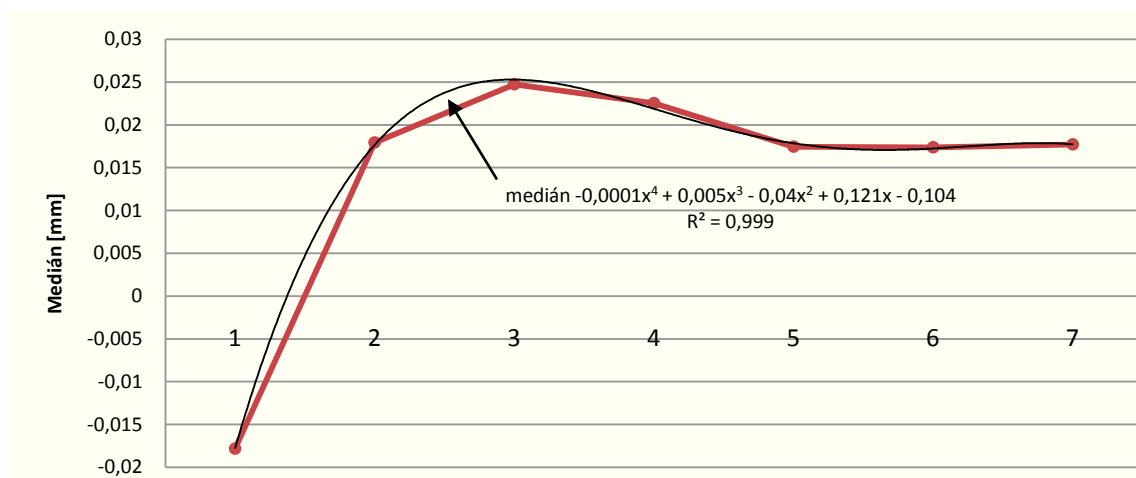
Obr. 5.1 Průběh hodnot mediánu při rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ , kde  $p = 350 \text{ [MPa]}$  a  $b = 15 \text{ [mm]}$ , Sada vzorků A, B, C a D, obráběný materiál AISI 309



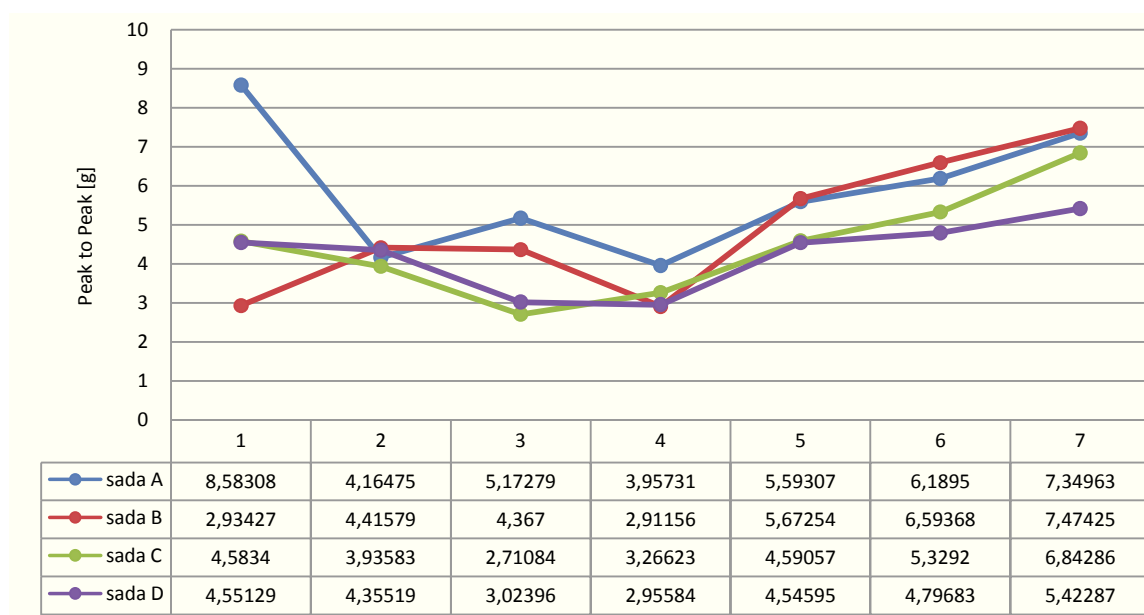
Obr. 5.2 Sumarizace průběhů hodnot mediánu při rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ , kde  $p = 350 \text{ [MPa]}$  a  $b = 15 \text{ [mm]}$ , Sada vzorků A, B, C a D, obráběný materiál AISI 309



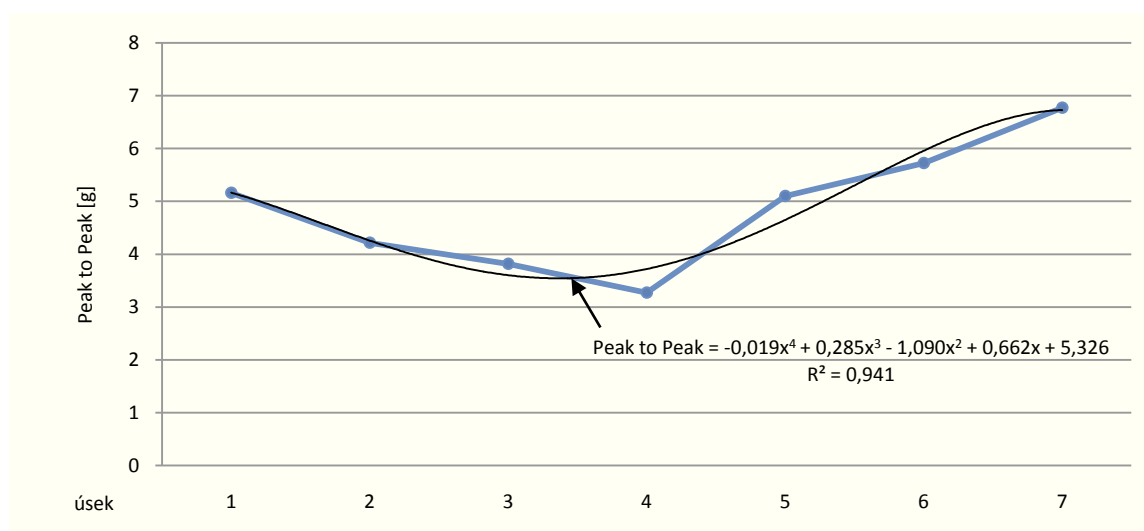
Obr. 5.3 Průběh hodnot mediánu při rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ , kde  $p = 350 \text{ [MPa]}$  a  $b = 15 \text{ [mm]}$ , Sada vzorků A, B, C a D, obráběný materiál AISI 309



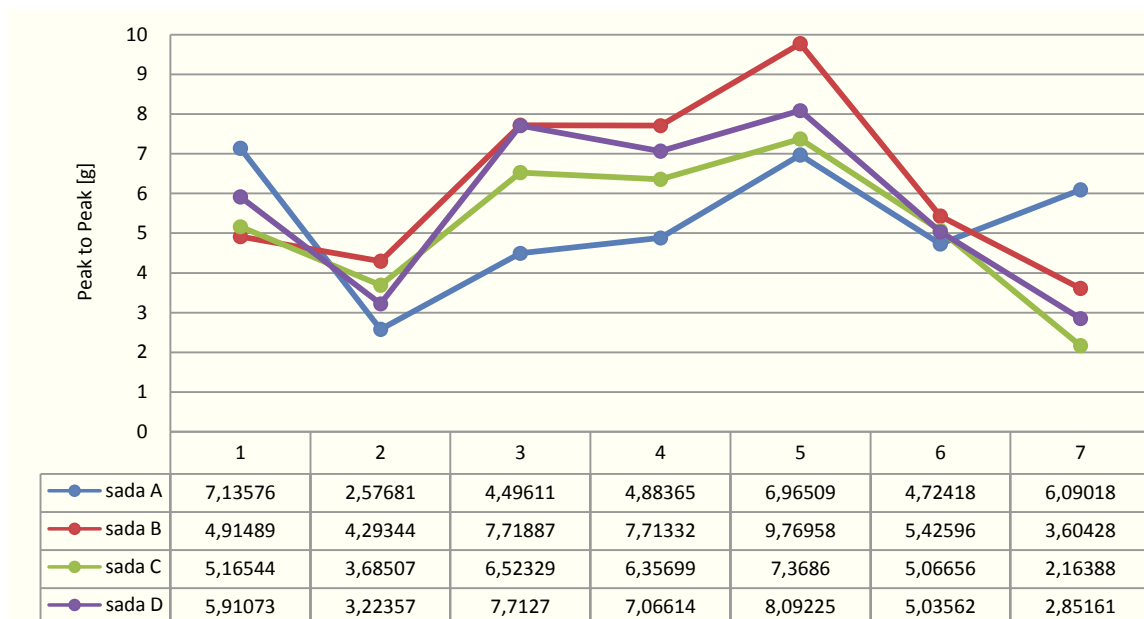
Obr. 5.4 Sumarizace průběhů hodnot mediánu při rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ , kde  $p = 350 \text{ [MPa]}$  a  $b = 15 \text{ [mm]}$ , Sada vzorků A, B, C a D, obráběný materiál AISI 309



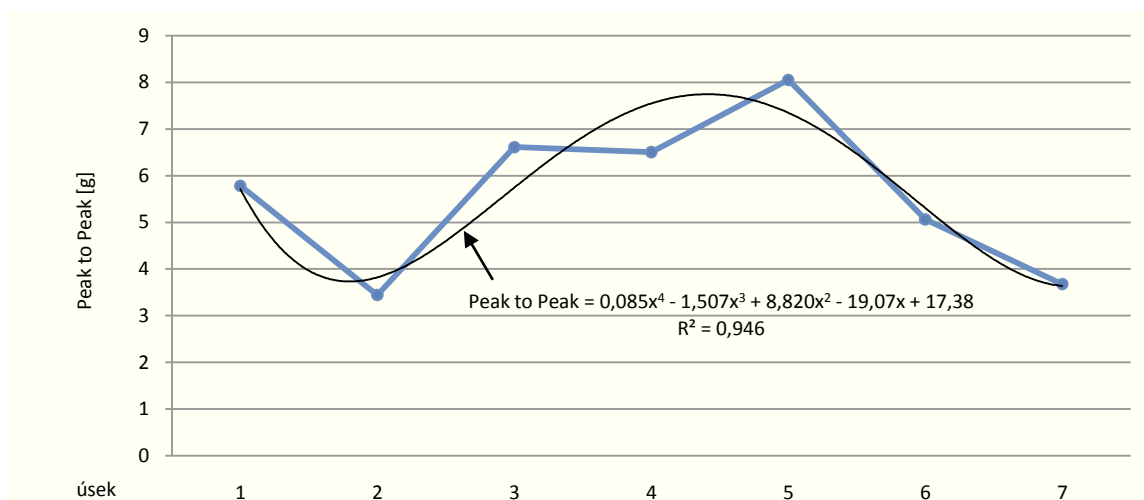
Obr. 5.5 Průběh hodnot Peak to Peak při rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ , kde  $p = 350 \text{ [MPa]}$  a  $b = 15 \text{ [mm]}$ , Sada vzorků A, B, C a D, obráběný materiál AISI 309



Obr. 5.6 Sumarizace průběhů hodnot Peak to Peak při rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ , kde  $p = 350 \text{ [MPa]}$  a  $b = 15 \text{ [mm]}$ , Sada vzorků A, B, C a D, obráběný materiál AISI 309



Obr. 5.7 Průběh hodnot Peak to Peak při rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ , kde  $p = 350 \text{ [MPa]}$  a  $b = 15 \text{ [mm]}$ , Sada vzorků A, B, C a D, obráběný materiál AISI 309



Obr. 5.8 Sumarizace průběhů hodnot Peak to Peak při rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ , kde  $p = 350 \text{ [MPa]}$  a  $b = 15 \text{ [mm]}$ , Sada vzorků A, B, C a D, obráběný materiál AISI 309

V praktické části experimentu jsme vyjádřili rovnice (1), (2), (3) a (4) vycházejících z fixních a variabilních technologických podmínek experimentu pro materiál AISI 903 o tloušťce  $b = 15$  [mm].

$$AE_M = -0,0001x^4 + 0,006x^3 - 0,038x^2 + 0,102x - 0,079 \quad (1)$$

$$AE_M = -0,0001x^4 + 0,005x^3 - 0,04x^2 + 0,121x - 0,104 \quad (2)$$

$$AE_{PTP} = -0,019x^4 + 0,285x^3 - 1,090x^2 + 0,662x + 5,326 \quad (3)$$

$$AE_{PTP} = 0,085x^4 - 1,507x^3 + 8,820x^2 - 19,07x + 17,38 \quad (4)$$

Tyto rovnice vycházející z Obr. 5.2, Obr. 5.4, Obr. 5.6 a Obr. 5.8 mohou být využity v procesu on-line řízení technologie hydroabrazivního obrábění. Výše uvedené rovnice jsou však pouhou jednou z částí celku regulačních rovnic potřebných pro systém on-line řízení automatizovaného procesu dělení, kde by byla nepřetržitě vyhodnocovaná akustická emise, rozumějme její projevy (teda i hodnoty  $AE_M$  a  $AE_{PTP}$ ) a neustále, automaticky (on-line) regulované i všechny ostatní parametry procesu dělení technologií AWJ.<sup>1</sup>

Návrh řídicího systému bude spočívat v měření a kontrole zadaných hodnot  $AE_M$  a  $AE_{PTP}$  dosažených při hydroabrazivním obrábění materiálu pomocí snímače akustické emise upevněného nad zaostřovací trubicí, kterého úlohou bude zaznamenávat průběh akustického signálu. tento signál bude zpracován v TIME záznamech a FFT spektrech, které určí možnou přípustnou odchylku odpovídající požadované hodnotě parametru mediánu či Peak to Peak. Při překročení maximální přípustné dříve nastavené amplitudy dojde i ke změně topografie povrchu. Jako nejvhodnější technologický faktor, pomocí kterého dosáhneme vrácení amplitud pod hranici maxima se jeví rychlost posuvu řezné hlavy. Další alternativou je možnost nepřímého způsobu on-line měření kvality povrchu pomocí vibrací. Tato problematika však bude cílem dalších navazujících prací.<sup>1</sup>

Námi zpracovávaná data jsou zaměřeny pouze na akustickou emisi a výstupní regulační rovnice nezahrnují komplexní ani konečné závislosti aplikovatelné k následnému on-line řízení automatizovaného procesu. Též nutno podotknout že při experimentu nebylo ideální pracovní prostředí, respektive, že experiment probíhal při plném chodu firmy.

## 6. ZÁVĚR

Technologie řezání vodním paprskem patří mezi nekonvenční způsoby obrábění. Historie vodního paprsku sahá do 60. let 20. století, kdy profesor Norman Franz a jeho kolegové v USA zkoumali vysokotlaké působení vodního proudu a zjistili, že lze s relativně malým poškozením obráběného povrchu obrábět dřevěné produkty s vysokými rychlostmi posuvu. Technologie byla zásadně vylepšena v 70. letech tím, že se do vodního proudu přidalo jemné abrazivo. Toto se stalo základním pilířem, který posloužil k rozšíření této metody, protože po přidání abraziva, bylo možno obrábět mnohem tvrdší a pevnější materiály. V následujícím období až do současnosti nastal ohromný pokrok. Prosazeno bylo AWJ v oblasti soustružení, frézování, řezání, vrtání, řezání apod. Postupným zdokonalováním se používá v počítačově řízeném obrábění.<sup>1, 3, 16, 74</sup>

Podstatou technologie hydro-abrazivního obrábění je obrušování děleného materiálu tlakem vodního paprsku s příměsí abrazivních částic soustředěného do jednoho místa. Aby systém AWJ či WJM mohl spolehlivě obrábět vysokotlakým paprskem, tak je potřeba vyvinout vysokého tlaku. Ten nám vytváří buďto pístové kompresory (do 270 [Mpa]) či hydraulické kompresory (do 400 [Mpa]). Paprsek vzniká v řezací hlavě zakončené řezací tryskou. Při zpracování měkčích materiálů se používá čistý vodní paprsek, pro ostatní aplikace se používá hydro-abrazivní paprsek. Nejčastější formou používaného abraziva jsou různé formy přírodního granátu a přírodního olivínu. Volba závisí zejména na tvrdosti děleného materiálu a požadavcích na výslednou kvalitu povrchu. Obrábění probíhá ve většině případů pomocí technologie CNC, kde je pohyb řezací hlavy, a tedy i dráha řezu je řízena počítačem na základě předem sestaveného programu. Je proto možné provádět i tvarově nejnáročnější řez během jedné operace.<sup>3, 74</sup>

Výhod, jež skýtá tato technologie, je velké množství. Za hlavní výhodu můžeme považovat univerzálnost, respektive to, že můžeme obrábět materiál nezávisle na materiálových vlastnostech jako je struktura, tvrdost či složení materiálu. Dalšími dílčími výhodami jsou například řezání bez tepelného ovlivnění řezaného materiálu, malý prořez materiálu, jednoduché obrábění velmi složitých a členitých tvarů a v neposlední řadě kvalita řezu, kde při vhodných technologických parametrech dosahujeme Ra pod 3,2. Nevýhodou je nutnost kontaktu s vodou a tím pádem charakteristiky s tím související (např. delší vysoušení, možnost rychlého působení povrchové koroze atd.), poté horší jakost povrchu, která není po celé ploše řezu kvalitativně stejná zejména u silných materiálů a částečně i za použití velké řezné rychlosti.<sup>3, 16</sup>

Výsledná kvalita je však závislá na mnoha proměnných. Snahou je získat sumarizaci získaných dat z množství provedených experimentů a predikovat výslednou topografii povrchu. V současné době neexistuje rozsáhlá studie, která by stanovila výslednou kvalitu povrchu pro každý druh obráběného materiálu. Důvodem je velké množství neznámých faktorů, které vstupují do procesu obrábění, a zásadním způsobem mohou ovlivňovat výslednou kvalitu povrchu. Cílem o zdokonalení predikce výsledné topografie povrchu je vyvinutí systému, který by byl schopen v procesu obrábění on-line měnit variabilní technologické parametry tak, aby bylo dosaženo co nejlepší výsledné kvality povrchu.<sup>3, 16</sup>

Tato diplomová práce se zabývá nepřímým způsobem on-line měření kvality povrchu pomocí akustické emise. Pomocí vykonaných experimentů zjišťujeme závislost mezi faktory hydro-abrazivního obrábění a samotnou akustickou emisí. Cílem této diplomové práce je analýza průběhu signálů akustické emise, porovnání jejích změn na začátku, v průběhu a na konci procesu obrábění, dále také stanovení, kde je signál stabilní a následné získání regulačních rovnic z průběhů hodnot  $AE_M$  a  $AE_{PTP}$  a jejich další aplikace do procesu on-line řízení technologie AWJ.

V průběhu experimentu bylo celkově vyrobeno 16 vzorků, kde jako proměnné parametry byly stanoveny hmotnostní tok abraziva  $m_a$ , rychlost posuvu řezné hlavy  $v$  a průměr zaostřovací trubice  $d_f$ . Experiment se prováděl na soustavě vzorků složených z bloků A, B, C a D. Obráběný materiál byl AISI 309 a tloušťka obráběného materiálu  $b = 15$  [mm]. Použité abrazivo bylo typu Barton Garnet o MESH 80. Sada A a sada B byla obráběna novou (neopotřebovanou) zaostřovací trubicí o průměru  $d_f = 0,8$  [mm] a sada C a sada D použitou (opotřebovanou) zaostřovací trubicí o průměru  $d_f = 1,4$  [mm]. Hmotnostní tok abraziva byl u sad vzorků A a C byl  $m_a = 400$  [g·min<sup>-1</sup>] a u sad B a D  $m_a = 250$  [g·min<sup>-1</sup>]. Rychlost posuvu řezné hlavy se měnila u každé sady vzorku a to na  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>],  $v = 75$  [mm·min<sup>-1</sup>],  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>],  $v = 150$  [mm·min<sup>-1</sup>]. Všechny experimenty se uskutečnily podle technologických parametrů uvedených v Tab. 3.1, Tab. 3.2, Tab. 3.3 a Tab. 3.4. Pro snímání akustické emise byl použit mikrofon umístěný nad zaostřovací trubicí, který byl chráněn vůči negativním vlivům, které by mohly nežádoucím způsobem ovlivnit výsledek experimentu. Výsledky byly zpracovávány v počítačového programu LabView®

V počáteční fázi experimentu jsme se zaměřili na zkoumání projevů akustické emise v závislosti na proměnné rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>],  $v = 75$  [mm·min<sup>-1</sup>],  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>],  $v = 150$  [mm·min<sup>-1</sup>] a času  $t$ . Zkoumány byly vzorky všech sad, tzn. Sada A, B, C a D. Následující průběhy akustického signálu byly rozděleny podle úseků, kde se provádělo měření.

Z experimentu vyplynulo, že v úseku 1 dochází ke zvýšení amplitud z důvodu prvotního průniku hydro-abrazivního proudu materiálem, a považujeme tento úsek za nestabilní. V úseku 2, 3, 6 a 7 dochází pouze k mírným výchylkám amplitud a z tohoto titulu hodnotíme jako proces stabilní. Při rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>],  $v = 75$  [mm·min<sup>-1</sup>] a  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>] v úseku 4 dochází k opětovnému mírnému kolísání amplitud, nicméně opětovně lze nazvat úsek za stabilní. Při zvyšování rychlosti posuvu řezné hlavy na  $v = 150$  [mm·min<sup>-1</sup>] dochází v tomto úseku k nestabilnímu řezu. Úsek 5 považujeme u všech zkoumaných sad vzorků za nejnestabilnější řez. Ze čtyř sledovaných rychlostí posuvu řezné hlavy hodnotíme jako nejstabilnější řez při  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>]. Vzhledem k okolnosti, že sada A byla obráběna novou zaostřovací trubicí o průměru  $d_f = 0,8$  [mm] s vyšším hmotnostním tokem abraziva  $m_a = 400$  [g·min<sup>-1</sup>], je logické, že bylo zjištěno že právě u této sady dochází k nejplynulejšímu řezu.

Další část práce se zabývala vyhledáváním periodických poklesů či nárůstů amplitud tak, aby jsme mohli dále tyto jevy s určitou pravděpodobností předpovídat. K tomuto jsme použili FFT analýzu spekter akustických emisí, kde je sledovaný signál transformovaný z amplitudově-časového hlediska do amplitudově-frekvenčního záznamu. Pro experiment bylo zvoleno sledované frekvenční pásmo  $2 \div 15$  [kHz]. Technologické parametry zůstaly totožné. Proměnné konstanty budou opět u sady vzorků A rychlosti posuvu řezné hlavy a to jmenovitě  $v = 50$  [mm·min<sup>-1</sup>],  $v = 75$  [mm·min<sup>-1</sup>],  $v = 100$  [mm·min<sup>-1</sup>] a  $v = 150$  [mm·min<sup>-1</sup>]. Cílem této experimentální části je vyhledávání periodických nárůstů a poklesů amplitud tak, aby je bylo možné v budoucnosti s určitou pravděpodobností predikovat.

Lze konstatovat, že při všech řezech a na všech úsecích docházelo k viditelnému periodickému nárůstu či poklesu amplitud. Jejich výskyt byl však velmi náhodného charakteru a dosahoval velmi nízkých hodnot. Pro praktické využití by tato studie nebyla použitelná, zejména z důvodu vysoké míry ovlivnitelnosti výsledků okolními vlivy prostředí. Celkově lze proto prohlásit, že nebyla prokázána významná závislost na variabilních parametrech experimentu.

Nacházející kapitola se zabývala významností faktorů ovlivňujících měřenou hodnotu, konkrétněji vlivem hmotnostního toku abraziva  $m_a$ , průměrů zaostřovacích trubic  $d_f$  a rychlostí posuvu řezné hlavy na parametr mediánu při jednotlivých úsecích  $v$ . Cílem tohoto experimentu mělo být zjištění míry významnosti právě těchto faktorů na námi sledovaném parametru mediánu.



Lze tvrdit, že z výše uvedených dat nebylo prokázáno, (Obr. 4.54 - Obr. 4.57), že by se projevovala výrazná spojitost mezi hmotnostním tokem abraziva, průměry zaostřovacích trubic či rychlostmi posuvu řezné hlavy a námi sledovaným parametrem mediánem. Zdůvodnění tohoto tvrzení vyplývá z faktu, že výsledná hodnota významnosti u každého ze sledovaných hodnot nepřesáhla 50%. Pro následnou úspěšnou aplikaci výsledků experimentu musí být hodnota výrazně vyšší, což nebylo u tohoto měření dosaženo.

V následující části práce jsem se věnoval analýze grafických průběhů hodnot  $AE_M$  a  $AE_{PTP}$ . Zkoumány byly rychlosti posuvů řezné hlavy  $v = 50$  [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ] a  $v = 100$  [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ] na jednotlivých úsecích. Výsledky jsou přehledně znázorněny v grafech, přičemž naměřené hodnoty zobrazují celkový průběh obrábění od prvotního průniku hydro-abrazivního proudu, až po uvolnění vzorku v závěru řezu.

Z provedených analýz vyplynulo, že při průniku materiálem jsou hodnoty mediánu nejnižší. V následujících úsecích 2 ~ 3 dochází k nárůstu hodnot až do maxima a pozvolnému poklesu, ten je více patrný u posuvu řezné hlavy  $v = 100$  [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ]. Průběhy hodnot Peak to Peak u nižší řezné rychlosti z počátku obrábění hodnoty amplitud mají klesající charakter až do úseku 4. Následně dochází k plynulému růstu až do hodnot maxima, které je v úseku 7. Se zvyšující se řeznou rychlostí dochází k transformaci hodnot amplitud, kdy mají ze začátku podobně klesající charakter až do úseku 2. Maximální hodnoty jsou naměřeny na úseku 5, pak však dochází k výraznému poklesu amplitud.

Závěrečná fáze práce využila získaných dat z předcházejících kapitol a výstupem je sumarizace dat do jednotlivých datových řad, ze kterých získáváme polynomicou regresi 4. řádu. Koeficient spolehlivosti byl stanoven na hodnotu  $R \geq 0,90$ , respektive na minimální hodnotu spolehlivosti 90 %. Rovnice  $AE_M$  či  $AE_{PTP}$  mohou být využity v procesu on-line řízení technologie hydro-abrazivního obrábění jako jistá řídicí funkce pro regulaci rychlosti posuvu řezné hlavy  $v$ . Dané rovnice jsou však pouhou jednou z částí celku regulačních rovnic potřebných pro systém on-line řízení automatizovaného procesu dělení, kde by byla nepřetržitě vyhodnocovaná akustická emise, rozumějme její projevy (teda i hodnoty  $AE_M$  a  $AE_{PTP}$ ) a neustále, automaticky (on-line) regulované i všechny ostatní parametry procesu dělení technologií AWJ.

Námi zpracovávaná data jsou zaměřena pouze na akustickou emisi a výstupní regulační rovnice nezahrnují komplexní ani konečné závislosti aplikovatelné k následnému on-line řízení automatizovaného procesu. K detailnější analýze on-line řízení technologie při AWJ by byla zapotřebí rozsáhlá experimentální studie, která však není cílem ani obsahem této práce.

**Poděkování:**

Ve své práci si dovoluji poděkovat za cenné připomínky, rady a trpělivost zejména mému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Robertu Čepovi, Ph.D. Dále děkuji konzultantovi diplomové práce, doc. Ing. Sergeji Hlochovi, PhD. za cenné rady a důležité informace. Přítelkyni Bc. Tereze Maťové za morální podporu.

Věnováno mému dědečkovi Josefu Slunečkovi.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HLOCH, Sergej, Jan VALÍČEK, Pavol HREHA, Slavomír BEDNÁR, Vincent PETRŽEL a Anna LATOVÁ. FAKULTA VÝROBNÝCH TECHNOLOGIÍ TU V KOŠICIACH SO SÍDLOM V PREŠOVE. *On-line identifikácia hydroabrazívneho delenia pomocou akustickej emisie a vibrácií*. 1. vyd. Prešov: Steevepress, Prešov-Šalgovik, 2012. ISBN 978-80-553-0698-8.
- [2] HLOCH, Sergej, Jan VALÍČEK. FAKULTA VÝROBNÝCH TECHNOLOGIÍ TU V KOŠICIACH SO SÍDLOM V PREŠOVE. *Vplyv faktorov na topografiu povrchov vytvorených hydroabrazívnym delením*. 1. vyd. Prešov: Steevepress, Prešov-Šalgovik, 2008. ISBN 978-80-553-0091-7.
- [3] Bednár, Slavomír: *Súvislosti medzi hladinou akustického tlaku a faktormi hydroabrazívneho delenia*. Diplomová práce. Prešov: Technická univerzita v Košiciach, Fakulta výrobných technológií, 2011. 85 s.
- [4] ŠIMÍČEK, Václav: *Nekonvenční technologie obrábění vodním paprskem*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2010. 84 s.
- [5] KLICH, Jiří: *Vliv posuvné rychlosti řezné hlavy na hlavní geometrické parametry povrchu vytvořeného hydroabrazivním dělením*. Diplomová práce. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2009, 63 s.
- [6] STEINER, Martin: *Současný stav a budoucnost nekonvenční technologie vodního paprsku v podmínkách průmyslu České republiky*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2008. 85 s.
- [7] KOPEČNÝ, Libor: *Abrazivní vodní paprsek*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2011. 72 s.
- [8] DEAM, R. T., LEMMA, E., AHMED, D. H. Modelling of the abrasive water jet cutting. *Wear* 2004 (257): 877-981.
- [9] EL-DOMIATY, A., ABDEL-RAHMAN, A. Fracture mechanics – based model of abrasive waterjet cutting for brittle materials. *J Adv Manufacturing Technologies* 1997 (13): 171-181.

- [10] Technologie. CHPS s.r.o. *Co je to vysokotlaký vodní paprsek?* [online]. 2010 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.chps.cz/vodni-paprsek/technologie.html>
- [11] Řezání vodním paprskem. WPT TECH s.r.o. *Princip dělení vodním proudem* [online]. 2012 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.wptech.cz/rezani-vodnim-paprskem/vyrobní-možnosti/princip-deleni-vodnim-proudem/>
- [12] Řezání vodním paprskem. WPT TECH s.r.o. *Dělení materiálů vodním proudem* [online]. 2011 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.wptech.cz/rezani-vodnim-paprskem/vyrobní-možnosti/deleni-materialu-vodnim-proudem/>
- [13] Geometrie řezu. CHPS s.r.o. *Jaké tvary lze vodním paprskem řezat?* [online]. 2010 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.chps.cz/vodni-paprsek/geometrie-rezu.html>
- [14] TRUCHOT, S., MELLINGER, S., DUCHAMP, R., KIM, J., OSAMPO, R. Development of cryogenic waterjet technique for biometal processing applications. In: 6th American Water Jet Conference August 24-27 1991, Houston, Texas, p. 473-480.
- [15] Aplikace řezání vodním paprskem. MM PUBLISHING, s.r.o. [online]. 2009 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/aplikace-rezani-vodnim-paprskem.html>
- [16] Řezání vodním paprskem: Kvalita řezu. ELNA SERVIS POČERADY S.R.O. [online]. 2009 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.elnaservis.cz/voda.htm>
- [17] HLAVATÝ, Ivo. *Vodní paprsek: Řezání materiálu vysokotlakým vodním paprskem* [online]. Ostrava, 2008 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: [homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/2-17.pdf](http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/2-17.pdf). Elektronická podpora výuky. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [18] Technologie vodního paprsku. FLOW, Inc. Kent, Washington, USA *Řezání čistým vodním paprskem* [online]. 2011 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.flowwaterjet.com/cs-CZ/waterjet-technology/pure-waterjet.aspx>
- [19] Technologie vodního paprsku. FLOW, Inc. Kent, Washington, USA *Řezání abrazivním vodním paprskem* [online]. 2011 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.flowwaterjet.com/cs-CZ/waterjet-technology/abrasive-waterjet.aspx>

- [20] Kavitace. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2013 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Kavitace>
- [21] Industrial Waterjet. SWA MEDLEMSSERVICE. [online]. 2010 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.swa.se/img/scaled/cuttinghead.jpg>
- [22] Úvod do strojírenství TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI.: *Technologie řezání vodním paprskem* [online]. [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: [http://www.kvm.tul.cz/studenti/texty/uvod\\_do\\_strojirenstvi/VZOR-sem-prace.pdf](http://www.kvm.tul.cz/studenti/texty/uvod_do_strojirenstvi/VZOR-sem-prace.pdf)
- [23] ZHOU, G. Statistical, random and fractal characterizations of surface topography with engineering applications. *Dissertation*. New Jersey: New Jersey Institute of Technology, Department of Mechanical and industrial engineering, 1993, p. 1-43.
- [24] Technologické faktory FLOW, Inc. Kent, Washington, USA: *Rychlost posuvu* [online]. 2011 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.flowcorp.cz/upload/Image/News/image001.png>
- [25] Technologické faktory FLOW FLOW, Inc. Kent, Washington, USA: *Rychlost posuvu* [online]. 2011 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.flowcorp.cz/upload/Image/News/image003.png>
- [26] Technologické faktory FLOW, Inc. Kent, Washington, USA: *Rychlost posuvu* [online]. 2011 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.flowcorp.cz/upload/Image/News/image005.png>
- [27] FLOW, Inc. Kent, Washington, USA [online]. 2011 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.flowcorp.cz/novinky-15/?aid=91>
- [28] FLOW, Inc. Kent, Washington, USA [online]. 2011 [cit. 2013-05-10]. [http://www.flowcorp.cz/upload/Image/News/rezani-vodnim-paprskem\\_big.jpg](http://www.flowcorp.cz/upload/Image/News/rezani-vodnim-paprskem_big.jpg)
- [29] FLOW, Inc. Kent, Washington, USA [online]. 2011 [cit. 2013-05-10]. <http://www.flowcorp.cz/technologie-dynamic-waterjet-29/>
- [30] Obráběcí stroje a technologie MM PUBLISHING, s.r.o.: *Frézování a gravírování nekonvenční technologií AWJ* [online]. 1. vyd. 2007 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/frezovani-a-gravirovani-nekonvencni-technologie-awj.html>

- [31] [online]. 2005 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0890695509000728-gr2.jpg>
- [32] Abrazivní materiál MESH 80 RYCHLÝ TOM, s.r.o. [online]. 2007 [cit. 2010-03-26].. Dostupné z WWW: <<http://www.rychlytom.cz/servis.html>>.
- [33] Abrasive, XINOLOGY CO., Ltd.: *The Tool to Cut Hard Materials at Faster Speed with Better Finish* [online]. 2011 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://xinology.com:888/Glass-Processing-Equipments-Supplies-Consumables/glass-cutting/water-jet-cutting/overview/abrasive.html>
- [34] Abrazivo PTV SPOL. S.R.O. [online]. 2011 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.ptv.cz/jnp/cz/produkty/abrazivo/index.html>
- [35] VALÍČEK, Jan; HLOCH, Sergej. *Měření a řízení kvality povrchů vytvořených hydroabrazivním dělením*. první. Ostrava : Ámos, 2008. 127 s. ISBN 978-80-254-3588-5.
- [36] Technologie vodního paprsku FLOW, Inc. Kent, Washington, USA.: *Technologie Hyperpressure* [online]. 2011 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.flowwaterjet.com/cs-CZ/waterjet-technology/hyperpressure.aspx>
- [37] KRAJNÝ, Zdenko. *Vodný lúč v praxi – WJM*. Bratislava: 1998. ISBN 80-8057-091-4.
- [38] SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění I.* 1. vydání. Ostrava : VŠB - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 2009. 152 s. ISBN 978-80-248-2107-8.
- [39] 39 - FLOW, Inc. Kent, Washington, USA. Aplikace a výrobky. 10 s. [online]. [cit. 2010-03-09]. Dostupné z URL: <[http://www.flowgmbh.com/pdf/prospekt\\_ap/Prospekt\\_A&P\\_CZ.pdf](http://www.flowgmbh.com/pdf/prospekt_ap/Prospekt_A&P_CZ.pdf)>
- [40] PIŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. 1. vydání Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. 247s. ISBN 978-802-1440-258.
- [41] CNC MACHINES INTL. *High Pressure Water & Abrasive Plumbing* [online]. 2005 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.cncmi.net/plumbing.htm>

- [42] Hydraulické hadice HYDAPRESS CZ S.R.O. [online]. 2009 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.hydapress.cz/userfiles/image/R15obr%281%29.png> 43 - [http://www.bombayharbor.com/productImage/0933379001259918151/Din2391\\_High\\_Pressure\\_Fuel\\_Pipe.JPG](http://www.bombayharbor.com/productImage/0933379001259918151/Din2391_High_Pressure_Fuel_Pipe.JPG)
- [43] High Pressure Fuel Pipe HAIBAO STEEL GROUP. [online]. 2008 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: [http://www.bombayharbor.com/productImage/0933379001259918151/Din2391\\_High\\_Pressure\\_Fuel\\_Pipe.JPG](http://www.bombayharbor.com/productImage/0933379001259918151/Din2391_High_Pressure_Fuel_Pipe.JPG)
- [44] Drinking Water Filter Buying Guide HOPEMARU ENTERPRISES INC.: *How to Select a Drinking Water Treatment System* [online]. 2011 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: [http://www.healthgoods.com/Drinking\\_Water\\_Filter\\_Buying\\_Guide\\_s/150.htm](http://www.healthgoods.com/Drinking_Water_Filter_Buying_Guide_s/150.htm)
- [45] Drinking Water Filter Buying Guide HOPEMARU ENTERPRISES INC.: *How to Select a Drinking Water Treatment System* [online]. 2011 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: [http://www.healthgoods.com/v/vspfiles/assets/images/mechanical\\_water\\_filters.jpg](http://www.healthgoods.com/v/vspfiles/assets/images/mechanical_water_filters.jpg)
- [46] MAŇKOVÁ, Ildíkó. *Progresívne technológie*. Košice: Technická univerzita Košice, Vienaľa, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
- [47] Potrubní filtry EUROCLEAR s.r.o.: *Filtrační vložky* [online]. 2012 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.zmekceni-vody.cz/82-filtracni-vlozka-fcpp-10-1-mikron.html>
- [48] PTV SPOL. S.R.O. *Vodní filtry* [online]. 2012 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: [http://www.ptv.cz/jnp/cz/produkty/nahradni\\_dily/Vodni\\_filtry/index.html](http://www.ptv.cz/jnp/cz/produkty/nahradni_dily/Vodni_filtry/index.html)
- [49] KRAJNÝ, Zdenko. *Vodný lúč v praxi – WJM*. Bratislava: 1998. ISBN 80-8057-091-4.
- [50] Abrasive water jet THE UNIVERSITY OF SHEFFIELD.: *Cutting Characteristics* [online]. 2010 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.wardjet.com/01-waterjet-cutting-characteristics.html>
- [51] MAŇKOVÁ, Ildíkó. *Progresívne technológie*. Košice: Technická univerzita Košice, Strojnícká fakulta. Edícia vedeckej a odborném literatúry. Vienaľa,vydavateľstvo a tlačiarén, 2000. 275 s. ISBN 80- 7099-430-4.

- [52] EFUNDA, Inc. *AISI Type 309: Mechanical Properties* [online]. 2010 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: [http://www.efunda.com/materials/alloys/stainless\\_steels/show\\_stainless.cfm?ID=AISI\\_Type\\_309&show\\_prop=all&Page\\_Title=AISI%20Type%20309](http://www.efunda.com/materials/alloys/stainless_steels/show_stainless.cfm?ID=AISI_Type_309&show_prop=all&Page_Title=AISI%20Type%20309)
- [53] Water jet cutting INDIAMART INTERMESH LIMITED.: *Stone Cutting Services* [online]. 2013 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.indiamart.com/jay-engineers-fabricators/water-jet-cutting.html>
- [54] Tegonology abrasive water jet on glass DIRECT INDUSTRY CORP. [online]. 2013 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: [http://img.directindustry.com/images\\_di/photo-g/abrasive-water-jet-cutting-head-7376-2832571.jpg](http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/abrasive-water-jet-cutting-head-7376-2832571.jpg)
- [55] LEBAR, A., JUNKAR, M. Simulation of abrasive water jet cutting process: Part 1. Unit event approach. *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.* 2004 (12): 1159-1170.
- [56] FOWLER, G., SHIPWAY, P. H., PASHBY, I. R. Abrasive water-jet controlled depth milling of Ti6Al4V alloy – an investigation of the role of jet – workpiece traverse speed and abrasive grit size on the characteristics of the milled material. *Journal of Material Processing Technology* 161 (2005): 407-414.
- [57] HASHIS, M.: A modeling study of mettall cutting with abrasive waterjets, *Trans. ASME, J, Eng. Mat. Technol.* 106 (1) (1984) 88.
- [58] CHEN, F. L., SIORES, E. The effect of cutting je variation on striation formation on abrasive water jet cutting. *International Journal of Machine tools & Manufacture* 41 (2001): 1479-1486
- [59] KIŠŠOVÁ, E. *Rezacia hlavica pre generovanie diskontinuálneho vodného lúča*. Diplomová práca, Sjf STU, Bratislava 1995, 67 s.
- [60] KRAJNÝ, Z. *Vodný lúč v praxi*. Mračko – Bratislava 1998
- [61] KRAJNÝ, Z., JAVORČÍK, L., GERTGOFFER, A. The High Pressure Water Jet Erosion Effect. In: 5-th Conference MMA-94, Flexible Technologie, Jun 94, Novi Sad, Yugoslavia.
- [62] KRAR, S., GILL, A. *Exploring advanced manufacturing technologies*. Industrial Press Inc. 2003, ISBN 0-8311-3150-0.



- [63] KURIAN, J.: Špeciálne materiály a technológie. I vyd. Košice: Technická univerzita, 1992. s.148-158. ISBN 80-7099-172-0
- [64] LEBAR, A., JUNKAR, M. - POREDOŠ A. CVJETICANIN M.: Method for online quality monitoring of AWJ cutting by infrared thermography, In CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, vol. 2, no. 3, pp 170-175, 2010
- [65] LU, C. Study on prediction of surface quality in machining process. Journal of materials processing technology 205 (2008): 439-450.
- [66] MANU, R - BABU, R. N.: An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials, Wear, Volume 266, Issues 11-12, 30 May 2009, Pages 1091-1097
- [67] MATÚŠKA, J. Delenie materiálov vodným lúčom. In Strojárstvo 1/2003, strana 35.
- [68] SUMMERS, D., A. Waterjetting technology. E & FN Spon, an imprint of Chapman & Hall 1995. p. 8-11. ISBN 0-419-19660-9.
- [69] KULECKI, K. M. Processes and apparatus developments in industrial waterjet applications. *Industrial Journal of Machine Tools & Manufacture* 42 (2002) 1297-1306.
- [70] GOMBÁR, V. Znižovanie zdrojov hlučnosti pri delení vysokorýchlostným hydroabrazívnym prúdom. *Diplomová práca*. Prešov: Technická univerzita v Košiciach, Fakulta výrobných technológií. 2007, 90 s.
- [71] HLOCH, S. Hlučnosť a technické možnosti jej znižovania pri delení materiálov vysokorýchlostným hydroabrazívnym prúdom. In: Bezpečná práca. roč. 38, č. 3 (2007), s. 3-7. ISSN 0322-8347.
- [72] HLOCH, S., GOMBÁR, V. Hodnotenie hlučnosti technológie AWJ pri delení materiálov. In: MM. Prumyslové spektrum. No. 1, 2 (2007), p. 78-80. ISSN 1212-2572.
- [73] Testování hypotéz CENTRUM ÚSTAV INFORMATIKY AKADEMIE VĚD ČR *Statistická významnost..* [online]. 1999 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://new.euromise.org/czech/tajne/ucebnice/html/html/node9.html>
- [74] Řezání vodním paprskem: Wikipedia: the free encyclopedia *Princip řezání vodním paprskem*. [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2013 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: [cs.wikipedia.org/wiki/Řezání\\_vodním\\_paprskem](http://cs.wikipedia.org/wiki/Řezání_vodním_paprskem)

## SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

Tab. 2.1 Nárůst teploty v závislosti na působícím tlaku .....	15
Tab. 2.2 Přímé faktory .....	21
Tab. 2.3 Nepřímé faktory .....	22
Tab. 2.4 Chemický rozbor australského granátu od firmy PTV spol. s r. o. ....	28
Tab. 2.5 Kvalitativní stupně řezu při technologii obrábění AWJ .....	31
Tab. 2.6 Oblasti aplikace čistého a hydroabrazivního proudu v praxi .....	35
Tab. 2.7 Srovnání parametrů nekonvenčních způsobů řezání materiálů .....	38
Tab. 3.1 Technologické faktory experimentu .....	40
Tab. 3.2 Parametry hydraulického čerpadla Stream Line Pump SL III .....	40
Tab. 3.3 Charakteristika obráběného materiálu AISI 309 .....	41
Tab. 3.4 Enviromentální podmínky experimentu .....	41
Tab. 4.1 Analýza FFT maximální hodnoty mediánu a peak to peak frekvencí signálů akustické emise u dvou řezných rychlostí na materiálu AISI 309 .....	60
Tab. 4.2 Analýza FFT maximální hodnoty mediánu a peak to peak frekvencí signálů akustické emise u dvou řezných rychlostí na materiálu AISI 309 .....	74
Tab. 4.3 Analýza FFT maximální hodnoty mediánu a peak to peak frekvencí signálů akustické emise u dvou řezných rychlostí na materiálu AISI 309 .....	88
Tab. 4.4 Analýza FFT maximální hodnoty mediánu a peak to peak frekvencí signálů akustické emise u dvou řezných rychlostí na materiálu AISI 309 .....	103

## SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Vývoj technologie vysokorychlostního hydroabrazivního proudu .....	8
Obr. 2.1 Technologická soustava pro AWJ.....	10
Obr. 2.2 Schéma hydraulického multiplikátoru.....	11
Obr. 2.3 Přívod řezného média do řezného nástroje. ....	12
Obr. 2.4 Vysokotlaké potrubí .....	12
Obr. 2.5 Šestivrstvá vysokotlaká hadice .....	13
Obr. 2.6 Druhy filtračních vložek.....	14
Obr. 2.7 Schéma řeznou hlavici. ....	15
Obr. 2.8 Tvary zaostřovacích trubic.....	16
Obr. 2.9 Opěrný rošt.....	16
Obr. 2.10 Souřadnicový stůl série Mach 4 od firmy Flow© International Corporation.....	17
Obr. 2.11 Odpadová nádrž .....	17
Obr. 2.12 Obrábění bez abraziva. ....	20
Obr. 2.13 Obrábění s abrazivem technologií AWJ.....	20
Obr. 2.14 Obrábění s abrazivem technologií LAS.....	20
Obr. 2.15 Závislost kvality povrchu na řezné rychlosti $0 \div 30 \%$ .....	22
Obr. 2.16 Závislost kvality povrchu na řezné rychlosti $30 \div 60 \%$ .....	23
Obr. 2.17 Závislost kvality povrchu na řezné rychlosti $80 \div 100 \%$ . ....	23
Obr. 2.18 Teoretická závislost výšky obrábění na výsledném tvaru řezného útvaru .....	24
Obr. 2.19 Experimentální závislost výšky obrábění na výsledném tvaru řezného útvaru.....	24
Obr. 2.20 Naklonění řezného nástroje.....	25
Obr. 2.21 Konvenční řezání Čas cyklu 21 min 23s Přesnost (úkos) 0,127 mm.....	25
Obr. 2.22 Řezání s DWJ® Čas cyklu 6 min 27s Přesnost (úkos) 0,038 mm .....	25

Obr. 2.23 Srovnání technologií .....	25
Obr. 2.24 Reliéf vytvořený metodou gravírování AWJ .....	26
Obr. 2.25 Abrasivním materiál MESH 80 .....	28
Obr. 2.26 Srovnání abrazivních částic .....	28
Obr. 2.27 Schematické znázornění oblastí při procesu dělení hydroabrazivním obráběním .....	32
Obr. 2.28 Různé kvality řezu při obrábění technologií AWJ .....	32
Obr. 2.29 Tvary úkosu .....	33
Obr. 2.30 Obráz vytvořený technologií AWJ .....	34
Obr. 2.31 Řezání skla technologií AWJ .....	34
Obr. 2.32 Aplikace Hydroabrazivního obrábění .....	36
Obr. 2.33 Robot tEODor® včetně technologie AWJ .....	36
Obr. 2.34 Řezání tlakové lahve technologií .....	37
Obr. 3.1 Vzorek před samotným experimentem .....	42
Obr. 3.2 Proces obrábění experimentálního vzorku .....	43
Obr. 3.3 Experimentální vzorky sady C a D po procesu obrábění .....	43
Obr. 3.4 Sady experimentálních vzorků A, B, C a D .....	44
Obr. 3.5 Systém na sběr dat NI PXI - 1031 .....	45
Obr. 3.6 Umístění mikrofonu .....	46
Obr. 4.1 Počítačové prostředí LabView® 2011 a analýza získaných dat .....	46
Obr. 4.2 Průběh signálu akustické emise, sada vzorků A, obráběný materiál AISI 309, $v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ , $p = 350 \text{ [MPa]}$ , $ma = 400 \text{ [g} \cdot \text{min}^{-1}]$ , $df = 0,8 \text{ [mm]}$ , $b = 15 \text{ [mm]}$ .....	47
Obr. 4.3 Průběh signálu akustické emise, sada vzorků A, obráběný materiál AISI 309, $v = 75 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ , $p = 350 \text{ [MPa]}$ , $ma = 400 \text{ [g} \cdot \text{min}^{-1}]$ , $df = 0,8 \text{ [mm]}$ , $b = 15 \text{ [mm]}$ .....	47
Obr. 4.4 Průběh signálu akustické emise, sada vzorků A, obráběný materiál AISI 309, $v = 100 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ , $p = 350 \text{ [MPa]}$ , $ma = 400 \text{ [g} \cdot \text{min}^{-1}]$ , $df = 0,8 \text{ [mm]}$ , $b = 15 \text{ [mm]}$ ....	48

Obr. 4.5 Průběh signálu akustické emise, sada vzorků A, obráběný materiál AISI 309, $v = 150$ [mm•min <sup>-1</sup> ], $p = 350$ [MPa], $ma = 400$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 0,8$ [mm], $b = 15$ [mm] ....	49
Obr. 4.6 FTT analýza sady vzorků A, první řez, obráběný materiál AISI 309, $p = 350$ [MPa], $ma = 400$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 0,8$ [mm], $b = 15$ [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora $v = 50$ [mm min <sup>-1</sup> ], $v = 75$ [mm•min <sup>-1</sup> ], $v = 100$ [mm•min <sup>-1</sup> ] a $v = 150$ [mm•min <sup>-1</sup> ] .....	51
Obr. 4.7 FTT analýza sady vzorků A, druhý řez, obráběný materiál AISI 309, $p = 350$ [MPa], $ma = 400$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 0,8$ [mm], $b = 15$ [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora $v = 50$ [mm min <sup>-1</sup> ], $v = 75$ [mm•min <sup>-1</sup> ], $v = 100$ [mm•min <sup>-1</sup> ] a $v = 150$ [mm•min <sup>-1</sup> ] .....	53
Obr. 4.8 FTT analýza sady vzorků A, třetí řez, obráběný materiál AISI 309, $p = 350$ [MPa], $ma = 400$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 0,8$ [mm], $b = 15$ [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora $v = 50$ [mm min <sup>-1</sup> ], $v = 75$ [mm•min <sup>-1</sup> ], $v = 100$ [mm•min <sup>-1</sup> ] a $v = 150$ [mm•min <sup>-1</sup> ] .....	54
Obr. 4.9 FTT analýza sady vzorků A, čtvrtý řez, obráběný materiál AISI 309, $p = 350$ [MPa], $ma = 400$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 0,8$ [mm], $b = 15$ [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora $v = 50$ [mm min <sup>-1</sup> ], $v = 75$ [mm•min <sup>-1</sup> ], $v = 100$ [mm•min <sup>-1</sup> ] a $v = 150$ [mm•min <sup>-1</sup> ] .....	55
Obr. 4.10 FTT analýza sady vzorků A, pátý řez, obráběný materiál AISI 309, $p = 350$ [MPa], $ma = 400$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 0,8$ [mm], $b = 15$ [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora $v = 50$ [mm min <sup>-1</sup> ], $v = 75$ [mm•min <sup>-1</sup> ], $v = 100$ [mm•min <sup>-1</sup> ] a $v = 150$ [mm•min <sup>-1</sup> ] .....	57
Obr. 4.11 FTT analýza sady vzorků A, šestý řez, obráběný materiál AISI 309, $p = 350$ [MPa], $ma = 400$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 0,8$ [mm], $b = 15$ [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora $v = 50$ [mm min <sup>-1</sup> ], $v = 75$ [mm•min <sup>-1</sup> ], $v = 100$ [mm•min <sup>-1</sup> ] a $v = 150$ [mm•min <sup>-1</sup> ] .....	58
Obr. 4.12 FTT analýza sady vzorků A, sedmý řez, obráběný materiál AISI 309, $p = 350$ [MPa], $ma = 400$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 0,8$ [mm], $b = 15$ [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora $v = 50$ [mm min <sup>-1</sup> ], $v = 75$ [mm•min <sup>-1</sup> ], $v = 100$ [mm•min <sup>-1</sup> ] a $v = 150$ [mm•min <sup>-1</sup> ] .....	59
Obr. 4.13 Průběh signálu akustické emise, sada vzorků B, obráběný materiál AISI 309, $v = 50$ [mm•min <sup>-1</sup> ], $p = 350$ [MPa], $ma = 250$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 0,8$ [mm], $b = 15$ [mm] .....	61

Obr. 4.14 Průběh signálu akustické emise, sada vzorků B, obráběný materiál AISI 309, $v = 75$ [mm•min <sup>-1</sup> ], $p = 350$ [MPa], $ma = 250$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 0,8$ [mm], $b = 15$ [mm] .....	61
Obr. 4.15 Průběh signálu akustické emise, sada vzorků B, obráběný materiál AISI 309, $v = 100$ [mm•min <sup>-1</sup> ], $p = 350$ [MPa], $ma = 250$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 0,8$ [mm], $b = 15$ [mm] ....	62
Obr. 4.16 Průběh signálu akustické emise, sada vzorků B, obráběný materiál AISI 309, $v = 150$ [mm•min <sup>-1</sup> ], $p = 350$ [MPa], $ma = 250$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 0,8$ [mm], $b = 15$ [mm] ....	63
Obr. 4.17 FTT analýza sady vzorků B, první řez, obráběný materiál AISI 309, $p = 350$ [MPa], $ma = 400$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 0,8$ [mm], $b = 15$ [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora $v = 50$ [mm min <sup>-1</sup> ], $v = 75$ [mm•min <sup>-1</sup> ], $v = 100$ [mm•min <sup>-1</sup> ] a $v = 150$ [mm•min <sup>-1</sup> ] .....	65
Obr. 4.18 FTT analýza sady vzorků B, druhý řez, obráběný materiál AISI 309, $p = 350$ [MPa], $ma = 400$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 0,8$ [mm], $b = 15$ [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora $v = 50$ [mm min <sup>-1</sup> ], $v = 75$ [mm•min <sup>-1</sup> ], $v = 100$ [mm•min <sup>-1</sup> ] a $v = 150$ [mm•min <sup>-1</sup> ] .....	66
Obr. 4.19 FTT analýza sady vzorků B, třetí řez, obráběný materiál AISI 309, $p = 350$ [MPa], $ma = 400$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 0,8$ [mm], $b = 15$ [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora $v = 50$ [mm min <sup>-1</sup> ], $v = 75$ [mm•min <sup>-1</sup> ], $v = 100$ [mm•min <sup>-1</sup> ] a $v = 150$ [mm•min <sup>-1</sup> ] .....	68
Obr. 4.20 FTT analýza sady vzorků B, čtvrtý řez, obráběný materiál AISI 309, $p = 350$ [MPa], $ma = 400$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 0,8$ [mm], $b = 15$ [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora $v = 50$ [mm min <sup>-1</sup> ], $v = 75$ [mm•min <sup>-1</sup> ], $v = 100$ [mm•min <sup>-1</sup> ] a $v = 150$ [mm•min <sup>-1</sup> ] .....	69
Obr. 4.21 FTT analýza sady vzorků B, pátý řez, obráběný materiál AISI 309, $p = 350$ [MPa], $ma = 400$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 0,8$ [mm], $b = 15$ [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora $v = 50$ [mm min <sup>-1</sup> ], $v = 75$ [mm•min <sup>-1</sup> ], $v = 100$ [mm•min <sup>-1</sup> ] a $v = 150$ [mm•min <sup>-1</sup> ] .....	71
Obr. 4.22 FTT analýza sady vzorků B, šestý řez, obráběný materiál AISI 309, $p = 350$ [MPa], $ma = 400$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 0,8$ [mm], $b = 15$ [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora $v = 50$ [mm min <sup>-1</sup> ], $v = 75$ [mm•min <sup>-1</sup> ], $v = 100$ [mm•min <sup>-1</sup> ] a $v = 150$ [mm•min <sup>-1</sup> ] .....	72

Obr. 4.23 FTT analýza sady vzorků B, sedmý řez, obráběný materiál AISI 309, $p = 350$ [MPa], $ma = 400$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 0,8$ [mm], $b = 15$ [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora $v = 50$ [mm min <sup>-1</sup> ], $v = 75$ [mm•min <sup>-1</sup> ], $v = 100$ [mm•min <sup>-1</sup> ] a $v = 150$ [mm•min <sup>-1</sup> ] .....	73
Obr. 4.24 Průběh signálu akustické emise, sada vzorků C, obráběný materiál AISI 309, $v = 50$ [mm•min <sup>-1</sup> ], $p = 350$ [MPa], $ma = 400$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 1,4$ [mm], $b = 15$ [mm] .....	75
Obr. 4.25 Průběh signálu akustické emise, sada vzorků C, obráběný materiál AISI 309, $v = 75$ [mm•min <sup>-1</sup> ], $p = 350$ [MPa], $ma = 400$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 1,4$ [mm], $b = 15$ [mm] .....	75
Obr. 4.26 Průběh signálu akustické emise, sada vzorků C, obráběný materiál AISI 309, $v = 100$ [mm•min <sup>-1</sup> ], $p = 350$ [MPa], $ma = 400$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 1,4$ [mm], $b = 15$ [mm] ...	76
Obr. 4.27 Průběh signálu akustické emise, sada vzorků C, obráběný materiál AISI 309, $v = 150$ [mm•min <sup>-1</sup> ], $p = 350$ [MPa], $ma = 400$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 1,4$ [mm], $b = 15$ [mm] ...	77
Obr. 4.28 FTT analýza sady vzorků C, první řez, obráběný materiál AISI 309, $p = 350$ [MPa], $ma = 400$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 1,4$ [mm], $b = 15$ [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora $v = 50$ [mm min <sup>-1</sup> ], $v = 75$ [mm•min <sup>-1</sup> ], $v = 100$ [mm•min <sup>-1</sup> ] a $v = 150$ [mm•min <sup>-1</sup> ] .....	79
Obr. 4.29 FTT analýza sady vzorků C, druhý řez, obráběný materiál AISI 309, $p = 350$ [MPa], $ma = 400$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 1,4$ [mm], $b = 15$ [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora $v = 50$ [mm min <sup>-1</sup> ], $v = 75$ [mm•min <sup>-1</sup> ], $v = 100$ [mm•min <sup>-1</sup> ] a $v = 150$ [mm•min <sup>-1</sup> ] .....	80
Obr. 4.30 FTT analýza sady vzorků C, třetí řez, obráběný materiál AISI 309, $p = 350$ [MPa], $ma = 400$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 1,4$ [mm], $b = 15$ [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora $v = 50$ [mm min <sup>-1</sup> ], $v = 75$ [mm•min <sup>-1</sup> ], $v = 100$ [mm•min <sup>-1</sup> ] a $v = 150$ [mm•min <sup>-1</sup> ] .....	82
Obr. 4.31 FTT analýza sady vzorků C, čtvrtý řez, obráběný materiál AISI 309, $p = 350$ [MPa], $ma = 400$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 1,4$ [mm], $b = 15$ [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora $v = 50$ [mm min <sup>-1</sup> ], $v = 75$ [mm•min <sup>-1</sup> ], $v = 100$ [mm•min <sup>-1</sup> ] a $v = 150$ [mm•min <sup>-1</sup> ] .....	83
Obr. 4.32 FTT analýza sady vzorků C, pátý řez, obráběný materiál AISI 309, $p = 350$ [MPa], $ma = 400$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 1,4$ [mm], $b = 15$ [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora $v = 50$ [mm min <sup>-1</sup> ], $v = 75$ [mm•min <sup>-1</sup> ], $v = 100$ [mm•min <sup>-1</sup> ] a $v = 150$ [mm•min <sup>-1</sup> ] .....	85

Obr. 4.33 FTT analýza sady vzorků C, šestý řez, obráběný materiál AISI 309, $p = 350$ [MPa], $ma = 400$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 1,4$ [mm], $b = 15$ [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora $v = 50$ [mm min <sup>-1</sup> ], $v = 75$ [mm•min <sup>-1</sup> ], $v = 100$ [mm•min <sup>-1</sup> ] a $v = 150$ [mm•min <sup>-1</sup> ] .....	86
Obr. 4.34 FTT analýza sady vzorků C, sedmý řez, obráběný materiál AISI 309, $p = 350$ [MPa], $ma = 400$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 1,4$ [mm], $b = 15$ [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora $v = 50$ [mm min <sup>-1</sup> ], $v = 75$ [mm•min <sup>-1</sup> ], $v = 100$ [mm•min <sup>-1</sup> ] a $v = 150$ [mm•min <sup>-1</sup> ] .....	87
Obr. 4.35 Průběh signálu akustické emise, sada vzorků D, obráběný materiál AISI 309, $v = 50$ [mm•min <sup>-1</sup> ], $p = 350$ [MPa], $ma = 250$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 1,4$ [mm], $b = 15$ [mm] .....	89
Obr. 4.36 Průběh signálu akustické emise, sada vzorků D, obráběný materiál AISI 309, $v = 75$ [mm•min <sup>-1</sup> ], $p = 350$ [MPa], $ma = 250$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 1,4$ [mm], $b = 15$ [mm] .....	89
Obr. 4.37 Průběh signálu akustické emise, sada vzorků D, obráběný materiál AISI 309, $v = 100$ [mm•min <sup>-1</sup> ], $p = 350$ [MPa], $ma = 250$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 1,4$ [mm], $b = 15$ [mm] ....	90
Obr. 4.38 Průběh signálu akustické emise, sada vzorků D, obráběný materiál AISI 309, $v = 150$ [mm•min <sup>-1</sup> ], $p = 350$ [MPa], $ma = 250$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 1,4$ [mm], $b = 15$ [mm] ....	91
Obr. 4.39 FTT analýza sady vzorků D, první řez, obráběný materiál AISI 309, $p = 350$ [MPa], $ma = 250$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 1,4$ [mm], $b = 15$ [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora $v = 50$ [mm min <sup>-1</sup> ], $v = 75$ [mm•min <sup>-1</sup> ], $v = 100$ [mm•min <sup>-1</sup> ] a $v = 150$ [mm•min <sup>-1</sup> ] .....	93
Obr. 4.40 FTT analýza sady vzorků D, druhý řez, obráběný materiál AISI 309, $p = 350$ [MPa], $ma = 250$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 1,4$ [mm], $b = 15$ [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora $v = 50$ [mm min <sup>-1</sup> ], $v = 75$ [mm•min <sup>-1</sup> ], $v = 100$ [mm•min <sup>-1</sup> ] a $v = 150$ [mm•min <sup>-1</sup> ] .....	94
Obr. 4.41 FTT analýza sady vzorků D, třetí řez, obráběný materiál AISI 309, $p = 350$ [MPa], $ma = 250$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 1,4$ [mm], $b = 15$ [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora $v = 50$ [mm min <sup>-1</sup> ], $v = 75$ [mm•min <sup>-1</sup> ], $v = 100$ [mm•min <sup>-1</sup> ] a $v = 150$ [mm•min <sup>-1</sup> ] .....	96
Obr. 4.42 FTT analýza sady vzorků D, čtvrtý řez, obráběný materiál AISI 309, $p = 350$ [MPa], $ma = 250$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 1,4$ [mm], $b = 15$ [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora $v = 50$ [mm min <sup>-1</sup> ], $v = 75$ [mm•min <sup>-1</sup> ], $v = 100$ [mm•min <sup>-1</sup> ] a $v = 150$ [mm•min <sup>-1</sup> ] .....	97



Obr. 4.43 FTT analýza sady vzorků D, pátý řez, obráběný materiál AISI 309, $p = 350$ [MPa], $ma = 250$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 1,4$ [mm], $b = 15$ [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora $v = 50$ [mm min <sup>-1</sup> ], $v = 75$ [mm•min <sup>-1</sup> ], $v = 100$ [mm•min <sup>-1</sup> ] a $v = 150$ [mm•min <sup>-1</sup> ] .....	99
Obr. 4.44 FTT analýza sady vzorků D, šestý řez, obráběný materiál AISI 309, $p = 350$ [MPa], $ma = 250$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 1,4$ [mm], $b = 15$ [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora $v = 50$ [mm min <sup>-1</sup> ], $v = 75$ [mm•min <sup>-1</sup> ], $v = 100$ [mm•min <sup>-1</sup> ] a $v = 150$ [mm•min <sup>-1</sup> ] .....	100
Obr. 4.45 FTT analýza sady vzorků D, sedmý řez, obráběný materiál AISI 309, $p = 350$ [MPa], $ma = 250$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 1,4$ [mm], $b = 15$ [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy seřazené od shora $v = 50$ [mm min <sup>-1</sup> ], $v = 75$ [mm•min <sup>-1</sup> ], $v = 100$ [mm•min <sup>-1</sup> ] a $v = 150$ [mm•min <sup>-1</sup> ] .....	101
Obr. 4.46 Průběh hodnot mediánu vycházející z Tab. 9.1 obráběný materiál AISI 309, sada A, kde $p = 350$ [MPa], $ma = 400$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 0,8$ [mm], $b = 15$ [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy $v = 50$ [mm•min <sup>-1</sup> ] a $v = 100$ [mm•min <sup>-1</sup> ].....	105
Obr. 4.47 Průběh hodnot mediánu vycházející z Tab. 9.2 obráběný materiál AISI 309, sada B, kde $p = 350$ [MPa], $ma = 250$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 0,8$ [mm], $b = 15$ [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy $v = 50$ [mm•min <sup>-1</sup> ] a $v = 100$ [mm•min <sup>-1</sup> ].....	105
Obr. 4.48 Průběh hodnot mediánu vycházející z Tab. 9.3 obráběný materiál AISI 309, sada C, kde $p = 350$ [MPa], $ma = 400$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 1,4$ [mm], $b = 15$ [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy $v = 50$ [mm•min <sup>-1</sup> ] a $v = 100$ [mm•min <sup>-1</sup> ].....	105
Obr. 4.49 Průběh hodnot mediánu vycházející z Tab. 9.4 obráběný materiál AISI 309, sada D, kde $p = 350$ [MPa], $ma = 250$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 1,4$ [mm], $b = 15$ [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy $v = 50$ [mm•min <sup>-1</sup> ] a $v = 100$ [mm•min <sup>-1</sup> ].....	107
Obr. 4.50 Průběh hodnot Peak to Peak vycházející z Tab. 9.1 obráběný materiál AISI 309, sada A, kde $p = 350$ [MPa], $ma = 400$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 0,8$ [mm], $b = 15$ [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy $v = 50$ [mm•min <sup>-1</sup> ] a $v = 100$ [mm•min <sup>-1</sup> ].....	107
Obr. 4.51 Průběh hodnot Peak to Peak vycházející z Tab. 9.2 obráběný materiál AISI 309, sada A, kde $p = 350$ [MPa], $ma = 250$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 0,8$ [mm], $b = 15$ [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy $v = 50$ [mm•min <sup>-1</sup> ] a $v = 100$ [mm•min <sup>-1</sup> ].....	107

Obr. 4.52 Průběh hodnot Peak to Peak vycházející z Tab. 9.3 obráběný materiál AISI 309, sada A, kde $p = 350$ [MPa], $ma = 400$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 1,4$ [mm], $b = 15$ [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy $v = 50$ [mm min <sup>-1</sup> ] a $v = 100$ [mm min <sup>-1</sup> ] .....	108
Obr. 4.53 Průběh hodnot Peak to Peak vycházející z Tab. 9.4 obráběný materiál AISI 309, sada A, kde $p = 350$ [MPa], $ma = 250$ [g•min <sup>-1</sup> ], $df = 1,4$ [mm], $b = 15$ [mm] při rychlostech posuvu řezné hlavy $v = 50$ [mm min <sup>-1</sup> ] a $v = 100$ [mm min <sup>-1</sup> ] .....	110
Obr. 4.54 Vliv průměrů zaostřovacích trubic, hmotnostního toku abraziva a rychlosti posuvu na parametr mediánu úseku 1 a 2. Obráběný materiál AISI 309, kde $p = 350$ [MPa] a $b = 15$ [mm] .....	112
Obr. 4.55 Vliv průměrů zaostřovacích trubic, hmotnostního toku abraziva a rychlosti posuvu na parametr mediánu úseku 3 a 4. Obráběný materiál AISI 309, kde $p = 350$ [MPa] a $b = 15$ [mm] .....	112
Obr. 4.56 Vliv průměrů zaostřovacích trubic, hmotnostního toku abraziva a rychlosti posuvu na parametr mediánu úseku 5 a 6. Obráběný materiál AISI 309, kde $p = 350$ [MPa] a $b = 15$ [mm] .....	113
Obr. 4.57 Vliv průměrů zaostřovacích trubic, hmotnostního toku abraziva a rychlosti posuvu na parametr mediánu úseku 7. Obráběný materiál AISI 309, kde $p = 350$ [MPa] a $b = 15$ [mm] .....	113
Obr. 5.1 Průběh hodnot mediánu při rychlosti posuvu řezné hlavy $v = 50$ [mm•min <sup>-1</sup> ], kde $p = 350$ [MPa] a $b = 15$ [mm], Sada vzorků A, B, C a D, obráběný materiál AISI 309 .....	115
Obr. 5.2 Sumarizace průběhů hodnot mediánu při rychlosti posuvu řezné hlavy $v = 50$ [mm•min <sup>-1</sup> ], kde $p = 350$ [MPa] a $b = 15$ [mm], Sada vzorků A, B, C a D, obráběný materiál AISI 309 .....	115
Obr. 5.3 Průběh hodnot mediánu při rychlosti posuvu řezné hlavy $v = 100$ [mm•min <sup>-1</sup> ], kde $p = 350$ [MPa] a $b = 15$ [mm], Sada vzorků A, B, C a D, obráběný materiál AISI 309 .....	116
Obr. 5.4 Sumarizace průběhů hodnot mediánu při rychlosti posuvu řezné hlavy $v = 100$ [mm•min <sup>-1</sup> ], kde $p = 350$ [MPa] a $b = 15$ [mm], Sada vzorků A, B, C a D, obráběný materiál AISI 309 .....	116

Obr. 5.5 Průběh hodnot Peak to Peak při rychlosti posuvu řezné hlavy $v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ kde $p = 350 \text{ [MPa]}$ a $b = 15 \text{ [mm]}$ , Sada vzorků A, B, C a D, obráběný materiál AISI 309 .....	117
Obr. 5.6 Sumarizace průběhů hodnot Peak to Peak při rychlosti posuvu řezné hlavy $v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ , kde $p = 350 \text{ [MPa]}$ a $b = 15 \text{ [mm]}$ , Sada vzorků A, B, C a D, obráběný materiál AISI 309 .....	117
Obr. 5.7 Průběh hodnot Peak to Peak při rychlosti posuvu řezné hlavy $v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ kde $p = 350 \text{ [MPa]}$ a $b = 15 \text{ [mm]}$ , Sada vzorků A, B, C a D, obráběný materiál AISI 309 .....	118
Obr. 5.8 Sumarizace průběhů hodnot Peak to Peak při rychlosti posuvu řezné hlavy $v = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ , kde $p = 350 \text{ [MPa]}$ a $b = 15 \text{ [mm]}$ , Sada vzorků A, B, C a D, obráběný materiál AISI 309 .....	118

## PŘÍLOHY

- Príloha A: Průběhy signálů akustické emise, Sada vzorků A je součástí DP v elektronické podobě na CD
- Príloha B: Průběhy signálů akustické emise, Sada vzorků B je součástí DP v elektronické podobě na CD
- Príloha C: Průběhy signálů akustické emise, Sada vzorků C je součástí DP v elektronické podobě na CD
- Príloha D: Průběhy signálů akustické emise, Sada vzorků D je součástí DP v elektronické podobě na CD
- Príloha E: DP v elektronické podobě na CD